

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

С. А. Тулупов
Н. Г. Шемшурова
О. Н. Тулупов

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Курс лекций

Магнитогорск
2010

УДК 621.70

Рецензенты:

*Доктор технических наук,
профессор кафедры обработки металлов давлением
ФГОУ ВПО «Государственный технический университет
«Московский институт стали и сплавов»*

О. М. Смирнов

*Кандидат технических наук,
заместитель начальника Центральной лаборатории контроля
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»*

В. Л. Корнилов

Тулупов С.А., Шемшурова Н.Г., Тулупов О.Н.

Теория обработки металлов давлением: курс лекций. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. – 175 с.
ISBN 978-5-9967-0099-8

В изложены теоретические основы обработки металлов давлением.

Курс лекций предназначен для студентов, обучающихся по направлению 150100 «Металлургия» специальности 150106 «Обработка металлов давлением». Может быть полезен студентам, аспирантам, инженерам, специализирующимся в области металлургии и управления качеством металлургической продукции.

УДК 621.70

ISBN 978-5-9967-0099-8

© ГОУ ВПО «МГТУ», 2010
© Тулупов С.А.,
Шемшурова Н.Г.,
Тулупов О.Н., 2010

ВВОДНАЯ ЛЕКЦИЯ

Металлические изделия, используемые в народном хозяйстве, имеют различную форму, размеры, свойства.

Промышленное применение имеют следующие методы придания формы металлическим телам: литье; обработка резанием; обработка давлением. (Другие методы: осаждение из растворов, стравливание – диаметр 0,009–0,01 мм.)

- **Литье** – недостаточная плотность, неоднородность свойств; целесообразно использовать для очень крупных и сложных изделий.
- **Обработка резанием** – много отходов; целесообразно использовать на заключительных стадиях обработки – высокая точность размеров, чистота поверхности.
- **Обработка давлением** – основана на пластичности металлов.

Пластичность – способность металла остаточно изменять свою форму и размеры без разрушения под действием внешних усилий.

Процессы обработки металлов давлением (ОМД): свободная ковка, штамповка (объемная, листовая), прессование, волочение, прокатка.

Свободная ковка. Применяют для получения крупных поковок (валы гребных винтов, диски турбин) либо для небольших партий поковок средних и малых размеров. При свободной ковке всю заготовку или ее отдельные участки (3) подвергают воздействию бойка молота или пресса (1, 2). При этом воздействие инструмента на боковые поверхности заготовки отсутствует или невелико (ковка в вырезных бойках).

Малопроизводительный процесс (вал атомохода «Арктика» делали 4 месяца), но дает очень высокое качество, какое невозможно получить другими видами обработки.

Объемная штамповка. Применяют при серийном и массовом производстве деталей средних и малых размеров на прессах и молотах. Заготовку помещают в полость штампа. Под воздействием давления заготовка деформируется, заполняя полость штампа.

Сложное изготовление штампов. Дорогой инструмент и его быстрый износ.

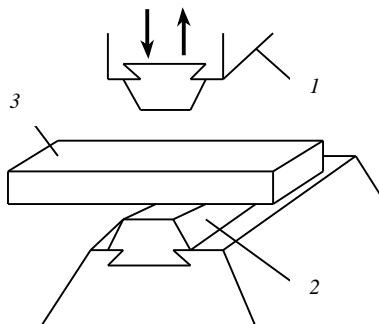


Схема процесса свободнойковки:
1 – верхний боек, 2 – нижний боек;
3 – заготовка

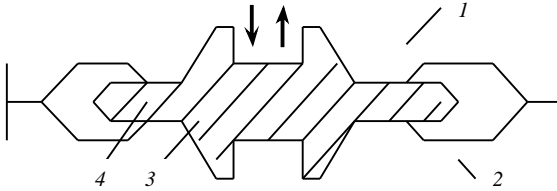


Схема объемной штамповки:

1, 2 – верхняя и нижняя части штампа; 3 – изделие; 4 – облой (заусенец)

Листовая штамповка. Для изготовления изделий из листов, используемых при производстве автомобилей, тракторов, самолетов, посуды и др., широко применяют листовую штамповку.

Прессование – выдавливание металла, находящегося в контейнере, через отверстие в матрице.

Трубы, прутки сложной формы поперечного сечения, в том числе с внутренними и наружными ребрами, формирование изделий с пониженными пластическими свойствами. Малая производительность, значительные затраты энергии на преодоление трения, малая длина готовых изделий.

Волочение – протягивание заготовки через отверстие конусообразной волоки.

Волочением получают проволоку, прутки, трубы. Изделие протягивают через отверстие в волоке, имеющее меньшее сечение, а иногда и иную форму. В результате уменьшается поперечное сечение изделия, увеличивается его длина (и форма). Точные размеры, чистая поверхность, упрочнение. Волочение в основном производят в холодном состоянии. Обжатие и производительность зависят от прочности переднего конца заготовки.

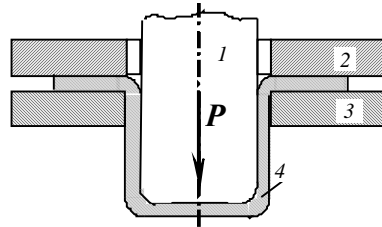


Схема листовой штамповки:

1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица; 4 – изделие

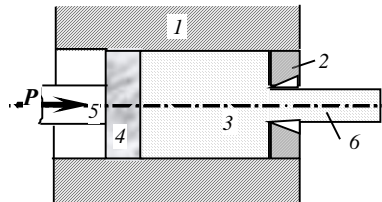


Схема процесса прессования:

1 – контейнер; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – пресс-шайба; 5 – пуансон; 6 – изделие

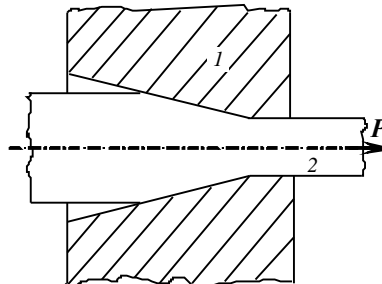


Схема процесса волочения:

1 – волока, 2 – пруток, P – усилие протяжки

Прокатка – процесс деформации металла, втягиваемого в зазор между двумя вращающимися валками за счет сил трения, путем обжатия.

Различают прокатку *продольную*, *поперечную* и *косую*.

При прокатке уменьшается толщина заготовки, увеличивается длина и частично ширина, а в ряде случаев изменяется и первоначальная форма заготовки. Процесс стабилен, хорошо автоматизируется.

Прокатка является одним из наиболее распространенных видов ОМД и имеет огромное народнохозяйственное значение. В настоящее время прокатке подвергается 75–80% всей выплавляемой стали и 55% выплавляемого цветного металла. Прокатка более экономична и производительна по сравнению с другими видами ОМД. Ею получают разнообразные профили.

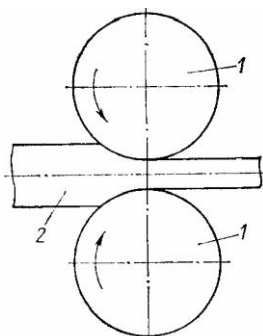


Схема продольной прокатки:

- 1 – верхний и нижний валки;
2 – прокатываемая полоса

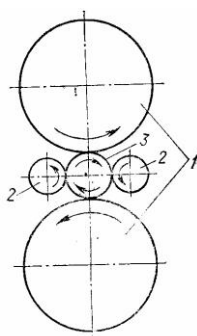


Схема поперечной прокатки:

- 1 – верхний и нижний валки;
2 – ролик;
3 – прокатываемое изделие

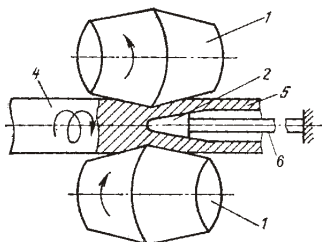
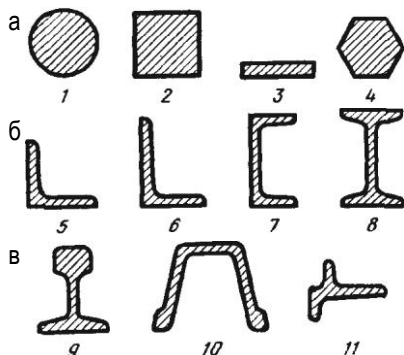


Схема поперечно-винтовой (косой) прокатки:

- 1 – правый и левый валки;
2 – оправка;
3 – линейки;
4 – заготовка;
5 – гильза;
6 – шланга (стержень)



Некоторые виды профилей, получаемых продольной прокаткой:

- а** – простые профили: 1 – круглый; 2 – квадратный; 3 – полосовой; 4 – шестигранный;
б – фасонные профили общего назначения: 5 – угловой равнополочный; 6 – угловой неравнополочный; 7 – швеллер; 8 – двутавровая балка;
в – фасонные профили специального назначения: 9 – рельс; 10 – шахтная стойка; 11 – оконнорамный профиль

Различные виды обработки металлов давлением имеют общую теоретическую базу и подчиняются одним и тем же законам пластической деформации, которые изучает наука «Теория ОМД».

Задачей теории ОМД (прикладная инженерная дисциплина) являются анализ и разработка общих принципиальных основ рационального построения процессов ОМД, которые обеспечивают получение металлургических заготовок и изделий нужной формы и качества.

Теория ОМД является научной базой «Технологии ОМД».

В задачу теории ОМД входит определение условий:

- обеспечения наивысшей пластичности металла;
- получения изделий с оптимальным сочетанием физико-механических свойств;
- обеспечения обработки минимальными усилиями.

Теория ОМД развивается в трех направлениях: физическом, физико-химическом и механико-математическом.

Физическое направление экспериментально и теоретически изучает механизмы пластической деформации и ее природу; определяет условия, при которых возникает пластическая деформация; рассматривает роль сил трения, температуры, скорости деформации, и др. на поведение металла при пластической деформации.

Основы этого направления заложены М.В. Ломоносовым и Д.К. Черновым, получили дальнейшее развитие в работах А.А. Бочвара, Н.Н. Давиденкова, М.Л. Бернштейна и др.

Физико-химическое направление изучает влияние химического состава и фазового состояния на поведение металла при пластическом деформировании (В.Д. Кузнецов, А.В. Степанов).

Механико-математическое направление изучает напряжения и деформации в пластически деформируемом теле и условия перехода упругой деформации в пластическую.

Математическая теория пластичности тесно связана с теорией упругости и использует ее аппарат. Однако математическая разработка вопросов пластической деформации значительно сложнее, чем в теории упругости, так как при пластической деформации имеет место непрерывное изменение свойств металла. Особенно сильно меняются свойства при больших пластических деформациях, которые имеют место на практике.

В связи с этим развитие математического направления теории невозможно без физического и физико-химического направлений.

Наибольший вклад в механико-математическое направление внесли С.А. Христианович, А.А. Ильющин, В.В. Соколовский.

Теория ОМД, как прикладная наука, основывающаяся на математической теории пластичности и металловедении, начала создаваться с 20-х годов XX столетия и развивается в настоящее время.

Особый вклад в теорию ОМД сделали С.И. Губкин, А.Н. Смирнов-Аляев, В.С. Смирнов, А.И. Целиков, И.М. Павлов, П.И. Полухин, А.А. Королев.

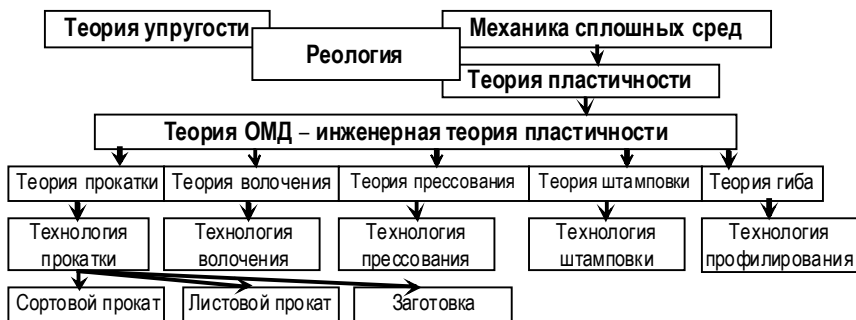
С целью снижения расхода металла в машиностроении на 20–25% предусматривается *расширение сортамента металлопродукции* (приближение формы изделия к готовому изделию), *повышение прочностных свойств металла*.

Расширение сортамента (усложнение формы изделий) – это вопросы формоизменения металла, увеличение его пластических свойств, совершенствование технологии, направленное на обеспечение оптимальных условий формоизменения, грамотный выбор инструмента и др.

Повышение механических свойств может быть осуществлено за счет термической обработки (4-й передел), но наибольший эффект дает так называемая **контролируемая прокатка** – целенаправленное изменение свойств путем совместного действия термической обработки и обработки давлением.

В настоящее время к металлургической продукции предъявляются требования не только по форме, но и по свойствам. Отсюда – новые требования и к теории ОМД. Пластическая деформация – не только способ изменения формы, но и эффективный способ изменения свойств металла, которые в ряде случаев являются главными (например, валы гребных винтов кораблей, трубы для нефте- и газопроводов).

Связь курса «Теория ОМД» с другими изучаемыми дисциплинами



Теория ОМД описывает общие закономерности существующих устройств и способов, использующих явление пластичности металлов для формоизменения, формообразования металлических тел, образования и изменения их свойств.

Структура курса «Теория ОМД»

1. Пластичность с физической, физико-химической и математической точек зрения.
2. Контактное трение, влияние инструмента и взаимодействие инструмента с металлом, усилие деформации.
3. Свойства и параметры процессов деформации (устойчивость пластического течения, разрушение при пластической деформации).
4. Окончательные свойства и характеристики (в продукте).

Рассматриваются:

- напряженное и деформированное состояния металла (повторение теории пластичности);
- физическая и физикохимическая природа пластической деформации, механизмы деформации на современном уровне, учение о дислокациях;
- влияние инструмента на процессы обработки металлов давлением и методы определения усилия деформирования;
- феноменологическая теория разрушения металлов;
- на основе теоретических знаний анализ процессов ОМД и основные принципы разработки технологических процессов;
- окончательные свойства и характеристики;
- новые методы ОМД: сверхпластичность, гидроэкструзия, деформация взрывом, космическая металлургия.

Цель курса:

- изучение процессов пластической деформации и их возможностей;
- грамотное использование факторов, влияющих на свойства металлов.

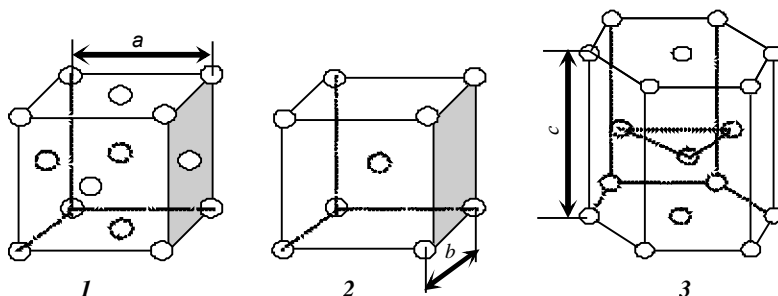
Раздел 1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Кристаллическое строение металлов

Металлы и сплавы имеют кристаллическое строение, которое характеризуется трехмерной повторяемостью одного и того же элемента (элементарной ячейки) на значительные расстояния. Совокупность множества соприкасающихся гранями элементарных ячеек образует пространственную решетку, всегда имеющую правильную геометрическую форму. Такое строение характерно для монокристалла. Однако технический металл представляет собой не единый кристалл (монокристалл), а конгломерат зерен-кристаллитов разных

размеров, форм с различным направлением кристаллографических осей. Такое строение называют поликристаллическим. В каждом зерне поликристалла атомы расположены упорядоченно в соответствии с пространственной решеткой данного металла.

Металлы имеют различные типы кристаллической решетки, наиболее распространенные из них: гранецентрированная кубическая решетка **1** (*Cu, Ag, Au, Al, Pb, Fe_γ, Pt, Ni*); объемноцентрированная кубическая решетка **2** (*K, V, Ta, Mo, W, Fe_α, Cr*); гексагональная плотно упакованная решетка **3** (*Be, Mg, Zn, Cd, Co*).



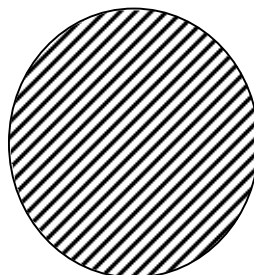
Правильность упаковки атомов в кристаллах обуславливает анизотропию свойств кристаллитов, а значит и монокристаллов, то есть в различных направлениях свойства металла будут различны. В ОМД важными являются такие свойства, **как пластичность и сопротивление деформации**. Значит и они в различных направлениях различны.

Пластическая деформация монокристаллов

Монокристалл – единичный кристалл с непрерывной кристаллической решеткой.

Если поверхность монокристалла отполировать, а затем пластически продеформировать, то она оказывается покрытой одной или несколькими системами параллельных линий.

Это ступеньки на поверхности металла, возникающие в результате сдвиговых смещений вдоль характерных кристаллографических плоскостей, называемых **плоскостями скольжения**. (*Скольжение* – сдвиг части кристаллита под воздействием касательных напряжений по характерным кристаллографическим плоскостям.) Направление сдвига – *направление скольжения*. Уста-



новлено, что плоскостями и направлениями скольжения являются плоскости и направления с наиболее плотной упаковкой атомов, так как при сдвиге в этих плоскостях и направлениях достигается минимальное нарушение правильности расположения атомов и, следовательно, само их смещение достигается с наименьшей затратой энергии. Их индексируют.

Кристаллографическая система индексации:

- для определения плоскостей, в круглых скобках, используют взаимно простые целые числа, пропорциональные обратной величине отрезков, отсекаемых плоскостью на координатных осях, причем, единица – это параметр решетки;
- для определения кристаллографических направлений, в квадратных скобках, используют взаимно простые целые числа, пропорциональные координатам любого атома решетки, лежащего на прямой (прямые идут всегда из начала координат).

В *ОЦК* плоскости скольжения – диагональные (110), а направления скольжения – диагонали этих плоскостей [111], в *ГЦК* плоскости скольжения – октаэдрические площадки (111), направления – параллельны сторонам октаэдрических площадок [110]. В *ГПУ* – это плоскости, параллельные основанию шестигранной призмы (0001) и направления – минимального расстояния между атомами [1210].

Совокупность плоскостей и направлений скольжения называют **системой скольжения**. Чем больше систем скольжения имеет металл, тем он более пластичный, тем больше у него возможностей протекания пластической деформации. Всего в *кубических решетках* по 4 плоскости скольжения и 3 направления скольжения, то есть 12 систем скольжения. В *ГПУ* – 1 плоскость скольжения и 3 направления скольжения, то есть 3 системы скольжения.

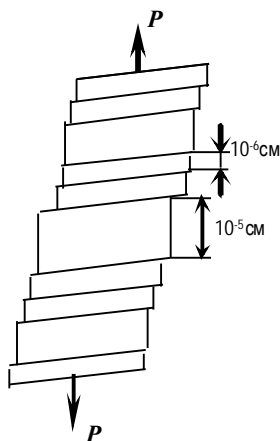
Механизмы пластической деформации

Рассмотрим механизмы пластической деформации монокристалла, где он проявляется в наиболее чистом виде.

Основными механизмами пластической деформации являются *скольжение и двойникование*.

Скольжение – значительно более распространенный механизм пластической деформации.

Всесторонне равномерное сжатие вызывает появление только упругой деформации: атомы сближаются, пока силы их отталкивания не уравновесят сжимающую нагрузку. При всестороннем равномерном растяжении также происходит лишь упругая деформация: расстояние между атомами увеличивается и, наконец, может



произойти разрыв межатомных связей – хрупкое разрушение, таким образом, ни всестороннее равномерное сжатие, ни растяжение не приводят к пластической деформации.

Основным типом нагрузки, обеспечивающим необратимое смещение атомов относительно друг друга без нарушения связи между ними, является нагрузка, вызывающая появление сдвига. Поэтому основным механизмом пластической деформации является **скольжение** атомов относительно друг друга в кристаллической решетке, которое вызывается **только сдвигом**. Это скольжение происходит,

как было сказано выше, по вполне конкретным кристаллографическим плоскостям и направлениям и, прежде всего, по плоскостям с наиболее плотной упаковкой атомов и по направлениям минимальных расстояний между ними.

Двойникование встречается значительно реже (Zn). В результате происходит мгновенный зеркальный перенос одной части кристаллита относительно другой. В плоскости двойникования не может быть проведена дальнейшая пластическая деформация.

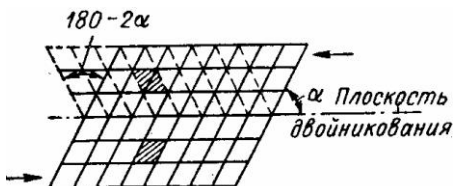
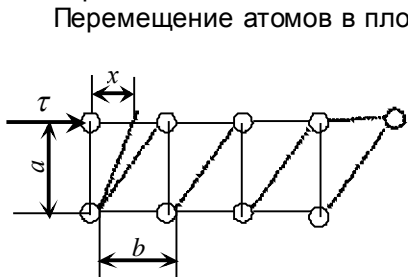


Схема двойникования при деформации монокристалла

Происходит в тех случаях, когда скольжение затруднено (высокие скорости деформации, низкие температуры). Конечная деформация этого эффекта меньше, чем при скольжении.

Скольжение, как основной механизм пластической деформации, происходит за счет **касательных напряжений**.



Перемещение атомов в плоскости скольжения может произойти лишь тогда, когда касательное напряжение в этой плоскости достигнет вполне определенной критической величины.

Найдем величину касательных напряжений τ , необходимых для перемещения атомов одного ряда относительно другого.

При сдвиге верхнего слоя атомов на величину $x < b/2$ будет действовать сила F , которая стремится вернуть атомы в первоначальное устойчивое положение; $x = b/2$ – неустойчивое равновесие; $x > b/2$ – атомы стремятся занять новое положение.

Критическое сдвиговое напряжение, которое нужно приложить, чтобы сдвинуть слой атомов на одно межатомное расстояние

$$\tau_{кр} = \frac{b^3}{2\pi a} \sigma,$$

где a, b – параметры решетки; σ – сопротивление сдвигу.

Из таблицы видно, что теоретическая величина этого напряжения на 2–3 порядка выше опытной величины. Значит, действительная картина не соответствует классическому механизму, по которому одна атомная плоскость целиком движется по соседней.

Наиболее логичное и последовательное объяснение механизма пластической деформации дает теория дислокаций, согласно которой скольжение атомов относительно друг друга есть результат перемещения дислокаций в плоскости сдвига.

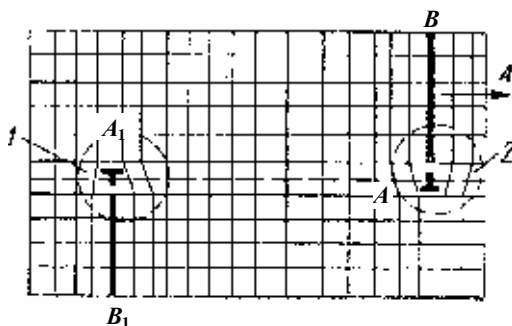


Схема атомной решетки с краевой дислокацией (1 – ⊥ – отрицательная, 2 – ⊥ – положительная)

Материал	Критическое сдвиговое напряжение $\tau_{кр}$, Н/мм ²	
	теоретическое	опытное
Алюминий	90,0	1,2–2,4
Медь	154,0	1,0
Серебро	970,0	0,6
Никель	2600,0	5,8
Магний	590,0	0,8

Дислокация – несовершенство кристаллической решетки, когда число атомных плоскостей, расположенных выше и ниже плоскости скольжения, неодинаково.

AB и A_1B_1 – лишний внедренный атомный слой (экстра-плоскости);

A и A_1 – края экстра-плоскости – это центры или ядра линейных краевых дислокаций.

Внедренные слои вызывают искажения решетки – уплотнение в зоне B (B_1) и разрежение в зоне ядер дислокаций. Расстояние между атомами в районе дислокации значительно больше или меньше, чем у правильной кристаллической решетки и атомы занимают неустойчивое

положение. С удалением от дислокаций на 2–3 периода решетки искажения затухают.

Следовательно, требуется значительно меньше усилий для смещения атомов из одного полуустойчивого положения в другое. Под действием сдвигающего напряжения (даже незначительного) дислокация в плоскости скольжения становится легкоподвижной. Перемещение дислокации на целое межатомное расстояние совершается благодаря незначительной перестановке атомов (эстафета «экстра-плоскости» в направлении сдвига), а большая часть атомов кристалла остается на своих местах. Если не окажется препятствий, скольжение дислокаций под действием τ будет продолжаться через весь кристалл, и одна его часть окажется сдвинутой относительно другой на величину периода решетки – это законченный элементарный акт пластической деформации.

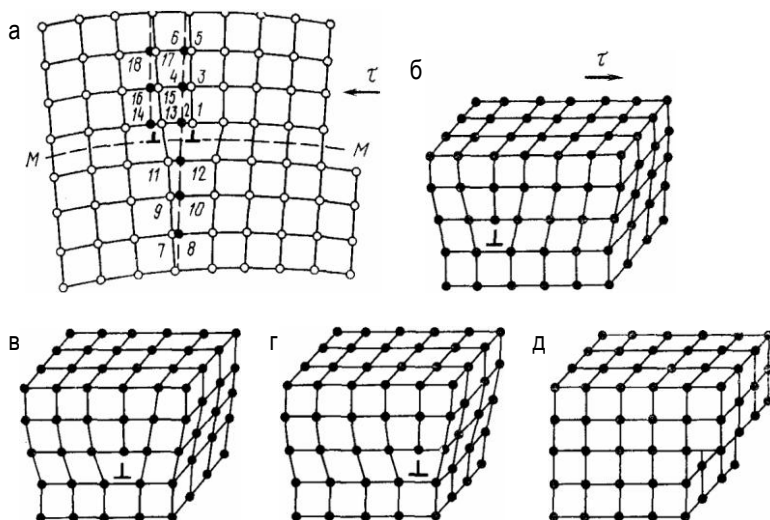


Схема перемещения краевой дислокации в результате частичного сдвига:
а – схема расположения дислокаций; **б–д** – этапы передвижения дислокации и выхода ее на поверхность; τ – напряжение сдвига; *MM* – плоскость сдвига

Выделяют винтовые дислокации – плавный сдвиг части решетки относительно другой на один параметр. Вокруг оси такой дислокации образуется винтовая поверхность с «правой» или «левой» спиралью – правая или левая дислокация. Предполагают, что реальные дислокации – смешанные: частично винтовые и частично краевые.

Можно было бы предположить, что по мере развития деформации дислокации выходят на поверхность, удаляются из кристал-

ла, его структура совершенствуется, и сопротивление скольжению должно стремиться к теоретическому. Но на самом деле при деформации дислокации и зарождаются, и накапливаются, то есть их плотность в объеме кристалла увеличивается.

В условиях, когда помимо внешних сил на деформируемое тело действует и температура (горячая обработка), механизм пластической деформации усложняется: к сдвиговому добавляется диффузионный (межфазовое перемещение через растворение и осаждение, межзеренное перемещение при наличии рекристаллизации поликристалла).

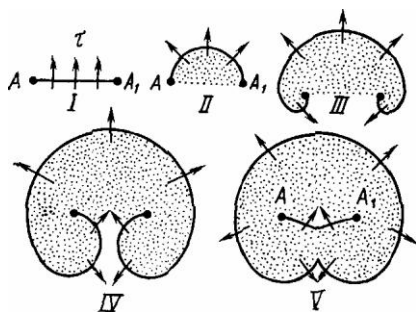
С позиций теории дислокаций **пластическая деформация** (необратимое изменение формы) – есть необратимое перемещение дислокаций. Деформация осуществляется за счет образования дислокации и ее пробега по кристаллу. Силу τ невозможно приложить одновременно равномерно ко всей плоскости скольжения, так как атомы связаны друг с другом упруго. Конечная деформация за счет пробега одной дислокации незначительна, но дислокаций в реальных металлах много: в отожженном металле 10^7 – 10^8 ед./см², в сильно деформированных металлах – 10^{12} ед./см². Следовательно, дислокации имеют место и в идеальных монокристаллах и образуются за счет внешних воздействий.

Механизмы образования дислокаций

Дислокации образуются:

- при росте кристаллов из расплава (энергетически трудно начинать новый ряд атомов);
- при срастании слегка разориентированных дендридов в процессе кристаллизации, поэтому максимальное число дислокаций находится на границе зерен (разориентация – за счет наличия градиента температур, конвекционных токов и др. причин);
- при захлопывании вакансий при построении из-за нехватки атомов;
- из-за неоднородности химического состава при затвердевании (параметры решеток двух фаз или химических компонентов не совпадают и на стыке образуются дислокации);
- при приложении нагрузки (образуются дислокации, которые затем двигаются, образуя пластическую деформацию);
- в процессе пластической деформации дислокации могут размножаться за счет источника Франка-Рида.

Дислокация закрепились в точках A и A_1 , например, примесными атомами и под действием τ будет выгибаться по стрелке, а ли-



Механизм образования дислокаций по Франку-Риду

нейное натяжение создает сопротивление, стремится дислокацию выпрямить. В какой-то момент линия AA_1 приняла форму полуокружности, но сопротивление ее дальнейшему перемещению возрастает.

Середина дуги начинает двигаться медленнее, а края быстрее; дислокация закручивается вокруг точек закрепления, кривая постепенно превращается в две сопряженные полуспирали, силовые поля которых притягиваются.

При соприкосновении спиралевидных дуг происходит разделение дислокации на две с образованием замкнутой кривой и криволинейной дислокации AA_1 .

Под действием τ замкнутая кривая приняла форму окружности и будет дальше расширяться, а дислокация AA_1 выпрямилась и снова начнет выгибаться.

Дислокации могут также зарождаться вблизи дефектов в сочетании с флуктуациями тепловой энергии.

Таким образом, **дислокации генерируются, размножаются и, перемещаясь, образуют пластическую деформацию.**

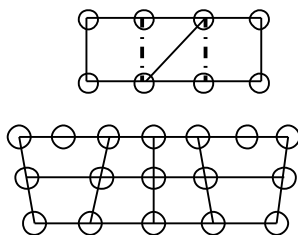
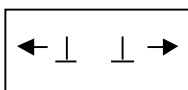
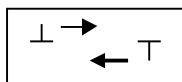
Усилие, необходимое для пластической деформации кристалла, определяется двумя факторами: наличием дислокаций и возможностью их перемещения.

При наличии дефектов строения (включений, искажений решетки) сопротивление деформации возрастает, так как они препятствуют движению дислокаций. Итак, с одной стороны, для снижения сопротивления необходимо иметь дефекты, способствующие образованию дислокаций при деформации, с другой – дефекты затрудняют движение дислокаций, что упрочняет металл. Такое двойственное влияние дефектов решетки на прочность обусловлено количеством дефектов.

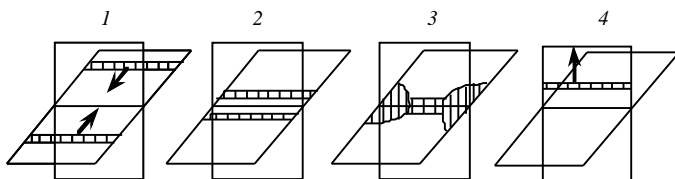
Взаимодействие и перемещение дислокаций

В области дислокаций атомы смещены из положений с минимумом потенциальной энергии – возникает поле напряжений, которое вызывает увеличение потенциальной энергии в этой области, то есть дислокации окружены силовыми полями. В процессе пластической деформации они взаимодействуют между собой.

1) Разноименные дислокации, расположенные в одной плоскости скольжения, притягиваются и взаимно уничтожаются. Одноименные дислокации, расположенные в одной плоскости скольжения, отталкиваются.

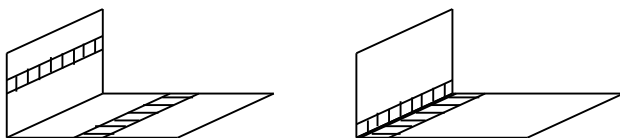


2) Переход дислокаций с одной плоскости на другую. Объединенные дислокации образуют узлы, которые требуют для начала движения значительно больших напряжений (это касается расщепленной дислокации). Этим объясняется явление упрочнения металлов, когда одни плоскости скольжения кончились. Переход дислокаций из одной плоскости скольжения в другую связан со значительными энергетическими трудностями.



3) Дислокации Ломер-Коттрелла (запертые дислокации). «Сидячие» объединившиеся дислокации образуют узлы. Для начала их движения требуются значительно большие напряжения. Этим объясняется явление упрочнения металлов.

Таким образом, явление упрочнения связано с затруднениями в перемещении дислокаций.



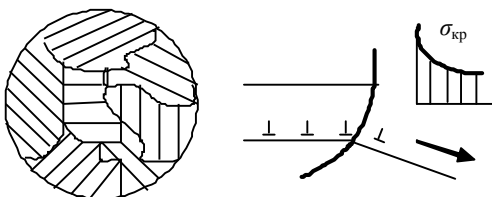
Механизмы и способы упрочнения металла

Чтобы управлять прочностью металла, нужно понять механизм упрочнения металлов при деформации, установить, почему одни металлы или сплавы труднее деформируются, чем другие, необходимо выяснить *механизм торможения дислокаций*.

1. Торможение дислокаций границами зерен и субзерен

Поликристалл состоит из множества монокристаллов, произвольно ориентированных в пространстве. Также произвольно ориентированы и плоскости преимущественного скольжения.

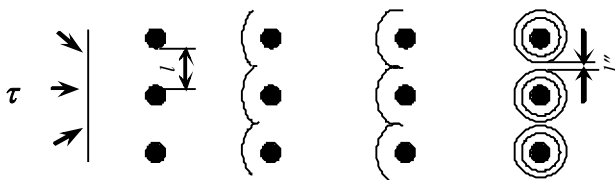
На границе зерна решетка резко меняет свою ориентировку. Силовое поле может быть настолько большим, что будет само генерировать дислокации – источник Франка-Рида.



Переход дислокаций на другую плоскость скольжения затруднен. Дислокации тормозятся у границы, скапливаются, образуется суммарное силовое поле, напряжения на границе нарастают, и при достижении напряжениями критической величины начинается переход дислокаций на другую плоскость скольжения. Поэтому пластическая деформация поликристаллов, имеющих множество границ зерен, требует значительно больших усилий, чем пластическая деформация монокристаллов.

Границы зерен могут быть проходимыми и непроходимыми. Если угол разориентации плоскостей скольжения соседних зерен составляет 4–5°, граница довольно легко проходима для дислокаций, хотя для этого требуются дополнительные усилия. Чем больше угол разориентации, тем менее проходима граница. Этим объясняется тот факт, что мелкозернистые структуры обладают и большей прочностью, и лучшей пластичностью.

2. Торможение дислокаций частицами другой фазы (или примесными атомами)



Расстояние $l'' < l$; при $l'' = l_{\text{критич.}}$ – граница становится непроходимой.

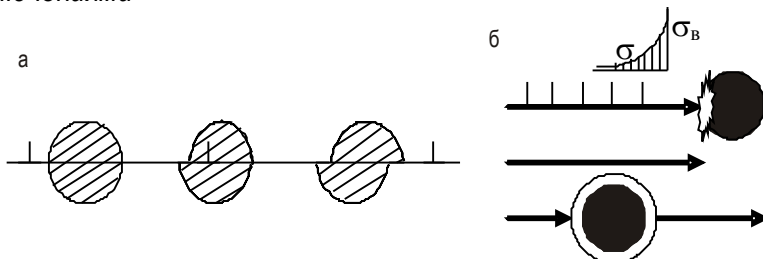
На огибание частиц фазы и их коагуляцию требуется дополнительная энергия. Вот почему двух- и более фазные металлы и сплавы являются более прочными, чем однофазные.

При прохождении второй дислокации расстояние между частицами другой фазы или примесными атомами l'' уменьшается, движение дислокаций еще более затрудняется и при достижении

$l''' = l_{\text{критич}}$ – данное препятствие может стать непроницаемым для дислокаций.

Чем больше пластическая деформация, тем сильнее упрочняется металл. Упрочнение тем больше (затрудняется движение дислокаций), чем мельче препятствия (частицы другой фазы или примесные атомы), чем ближе они расположены друг к другу и чем их больше.

3. *Торможение дислокаций примесями или неметаллическими включениями*



Дислокация может упереться в неметаллическое включение или в частицу примеси и вызвать в последней сдвиг (а), но на это требуются дополнительные затраты энергии, следовательно, металл упрочняется. Дислокации скапливаются у неметаллических включений, создавая пиковые напряжения (б). Если в металле много примесей или неметаллических включений, дислокации не могут двигаться дальше, возникающие напряжения превышают величину $\sigma_{\text{в}}$ деформируемого металла, образуется трещина (металл хрупкий).

(Неметаллические включения – макро- и микрочастицы в металлах и сплавах – оксиды, силикаты, сульфиды, нитриды, образуются в результате раскисления или окисления металла.)

Кроме того, в примесях скорость движения дислокаций значительно ниже. В металле скорость движения дислокации равна скорости движения звука в металле. Атомы примеси могут двигаться в основном только за счет диффузии, а эта скорость незначительна и очень сильно зависит от температуры.

Таким образом, ясны механизм и пути повышения прочностных и пластических свойств стали. **Чтобы увеличить прочность стали, необходимо затормозить дислокации в их движении.** (Пластическая деформация – необратимое движение дислокаций.)

Способы упрочнения металла

1. *Введение примесей или создание другой фазы. Здесь действуют два механизма:*

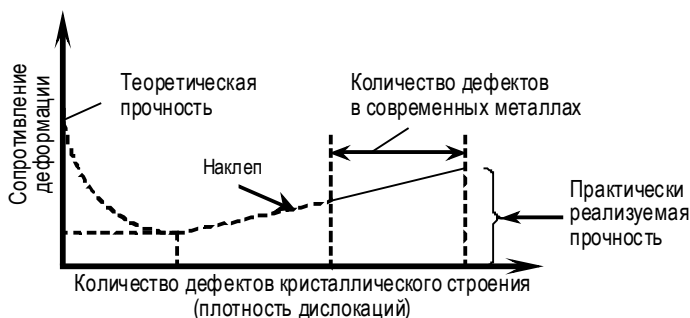
- дислокации требуются дополнительная энергия на преодоление, огибание препятствий;

– часть примесей задерживают дислокации, образуя сильное силовое поле. И даже если дислокация проходит мимо примесей, она все равно взаимодействует с силовым полем других дислокаций и тормозится.

Этим объясняется, почему сплавы всегда прочнее чистых металлов.

2. Повышение плотности дислокаций

Теоретическая прочность может быть достигнута при очень большой плотности дислокаций. Они своими силовыми полями мешают друг другу, тормозят и запирают друг друга (Коттрелл). Работоспособность материала с теоретической прочностью очень мала. Такой материал может работать только упруго.

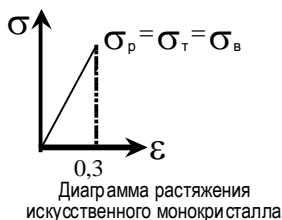


В настоящее время растягивают «сапфировые усы» (монокристаллы) с прочностью 19000 Н/мм^2 и при 0°C , и при 1300°C . Их заправляют в вольфрам для головок космических кораблей. Но подвесить на таких нитях мост нельзя – очень хрупкий материал.

Те критические напряжения, которые могут возникнуть при работе, не находят выхода в локальных пластических деформациях, за счет которых они уменьшались бы, и металл хрупко разрушается. Снятие напряжений, которые могут достигать величины σ_v , возможно за счет протекания локальной пластической деформации. Наводить дислокации можно за счет пластической деформации.

3. Создание внутри металла различного типа границ

Дислокации движутся по плоскостям скольжения и для перехода из одной плоскости в другую, расположенную под некоторым углом к первой, требуются дополнительные усилия. Это объясняет, почему поликристаллы всегда прочнее монокристаллов. Создание мелкой структуры способствует упрочнению, но необходи-



мо, чтобы границы зерен были проницаемы для дислокаций, чтобы пиковые, экстремальные напряжения могли сниматься за счет пересаживания дислокаций в плоскости скольжения других зерен. Для этого необходимо иметь малую разориентацию зерен – 4–5°.

4. Упорядочивание

Кристаллическое упорядочивание или двойникование. Если прошло двойникование, то скольжение не может произойти в этом объеме. Двойникование происходит при пластической деформации с очень высокой скоростью (деформация взрывом) или при низких температурах. Такая обработка упрочняет металл.

Каждый из четырех способов упрочнения может дать увеличение прочности примерно на 800 Н/мм², то есть в сумме возможно получить 3200 Н/мм². Но использовать такой металл невозможно, так как он достигает почти теоретической прочности, но является очень хрупким. *Достижение в каком-либо объеме напряжениями сверхкритической величины приводит к образованию трещин и разрушению.*

Так как дислокации заперты и не могут двигаться, то напряжения не могут и релаксировать, то есть уменьшаться за счет протекания деформации в локальных зонах.

Существует понятие «инженерная прочность»: в конструкциях в каких-либо локальных зонах могут протекать пластические деформации, которые не приводят к пластической деформации объекта в целом. Возможность протекания локальных пластических деформаций, которые предотвращают образование трещин, увеличивает диапазон работоспособности материала (газопроводы северного исполнения).

Таким образом, чтобы поднять предел текучести, нужно закрепить дислокации, но при этом уменьшается относительное удлинение.

Чтобы одновременно увеличить и прочностные (σ_T), и пластические (δ_5) характеристики металла, следует пользоваться «теорией барьеров» (1972 г.).

Известны два типа барьеров: проницаемые и непроницаемые. Непроницаемые барьеры: большеугловые границы зерен; фаза, отличная от матрицы; сильный наклеп, когда все дислокации связаны в сетки и являются неподвижными.

Необходимо создавать в металле полупроницаемые барьеры, которые будут удерживать дислокации, но при «пиковых» напряжениях пропустят их в соседний объем.

Имеются два типа полупроницаемых границ:

- малоугловая разориентация зерен;
- в матрице сплава имеется фаза, когерентная с основной структурой (очень похожие решетки).

В идеале сплав должен быть без большеугловых границ зерен (должна быть мозаичность структуры). Такую структуру можно получить в результате полигонизации: холодная (теплая) деформация + нагрев (температура ниже температуры рекристаллизации) + последеформационная выдержка + закалка.

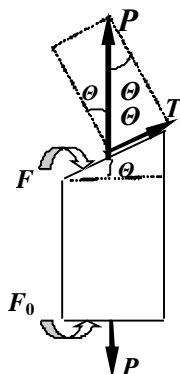
Пластическая деформация поликристалла. Особенности внутри- и межзеренной деформаций

Промышленный металл – поликристалл, его деформация неравномерна. Зерна, которые образуются в процессе кристаллизации из расплава, могут иметь неодинаковый химический состав. Между зернами имеются границы, вблизи которых свойства зерен отличаются от внутренних частей. Это межзеренное вещество содержит примеси, неметаллические включения, которые вытесняются при росте зерна к периферии, другая фаза металла и др. Кроме того, у границ скапливаются дислокации, которые тормозятся и образуют дополнительное силовое поле.

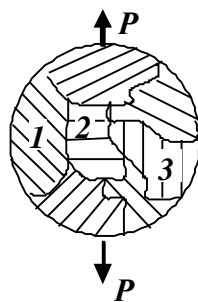
Таким образом, имеется неоднородность свойств не только от зерна к зерну, но и внутри каждого зерна. Следовательно, *деформируемость разных участков металла различна.*

Деформация поликристалла осуществляется в результате деформации каждого отдельного зерна и взаимного перемещения зерен относительно друг друга.

Зерна в отожженном металле расположены хаотически – тело квазиизотропно. Но сами зерна ввиду кристаллического строения имеют четко выраженную анизотропию. Возможные плоскости скольжения расположены под разными углами по отношению к направлению действующих сил (см. рисунок – плоскости скольжения обозначены штриховкой).



В зернах 1 деформация будет происходить в первую очередь, так как плоскости скольжения в них расположены под углом 45°.



Касательное напряжение в плоскости скольжения и в направлении скольжения при растяжении **монокристалла** силой P можно определить из следующего выражения:

$$\tau = T/F ; T = P \cdot \sin \Theta = F_0 \sigma \sin \Theta ;$$

$$P = F_0 \cdot \sigma ;$$

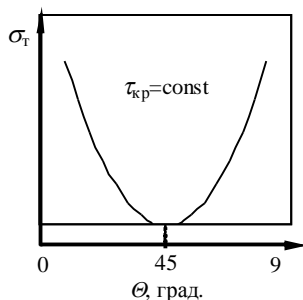
$$F_0/F = \cos \Theta; \Rightarrow F = F_0/\cos \Theta;$$

$$\tau = \frac{F_0 \sigma \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta}{F_0} = \sigma \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta.$$

Чтобы началась пластическая деформация при линейном напряженном состоянии, необходимо, чтобы $\sigma_1 = \sigma_T \rightarrow \tau = \tau_{кр}$ – касательные напряжения достигают критического значения.

$$\sigma_T = \frac{\tau_{кр}}{\sin \Theta \cdot \cos \Theta}.$$

При постоянном значении касательного напряжения ($\tau_{кр} = \text{const}$) существующая зависимость $\sigma_T = f(\Theta)$ показывает, что для осуществления пластической деформации минимальное растягивающее напряжение будет приложено в зернах с плоскостями скольжения, ориентированными под углом 45° к направлению растяжения.



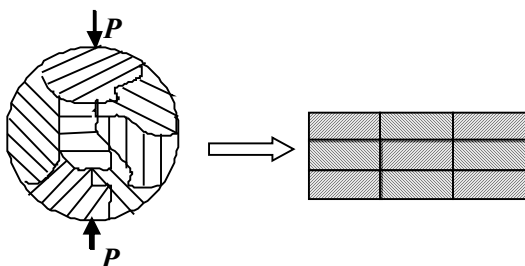
Таким образом, для зерен 2 и 3, в которых плоскости скольжения соответственно перпендикулярны и параллельны относительно прикладываемой нагрузки, невозможно осуществить пластическую деформацию.

Следовательно, в поликристалле деформация распределяется крайне неравномерно.

Следует отметить, что поликристалл имеет обычно несколько различно ориентированных плоскостей скольжения, поэтому какая-нибудь из них располагается удовлетворительно по направлению действия сил, но на осуществление пластической деформации по неосновной плоскости (менее плотно упакованной атомами) требуются значительные затраты энергии.

Степень неравномерности деформации тем выше, чем меньше систем скольжения имеет данный металл (совокупность плоскостей и направлений скольжения).

Продеформированные зерна оказывают дополнительные усилия на недеформированные зерна, что заставляет последние поворачиваться, располагаясь более благоприятно к направлению действия сил, и они начинают пластически деформироваться. При этом происходит дальнейшее упрочнение металла.



В процессе пластической деформации наблюдается изменение ориентировки зерен, неупорядоченная структура становится упорядоченной, образуя **текстуру**. Зерна вытягиваются в на-

правлении деформации, анизотропия отдельных зерен совпадает и поликристаллическое тело превращается из изотропного в анизотропное (в различных направлениях металл имеет различные свойства, что особенно важно для листового проката).

Следует отметить, что процессы внутривитриной деформации протекают значительно легче, чем по границам зерен и межзеренная деформация, так как за счет ликвации (неодновременное за твердевание и скопление по границам зерен примесей) по границам зерен кристаллизуется более хрупкая и твердая составляющая фаза, скапливаются неметаллические включения, примеси, дислокации и т.д.

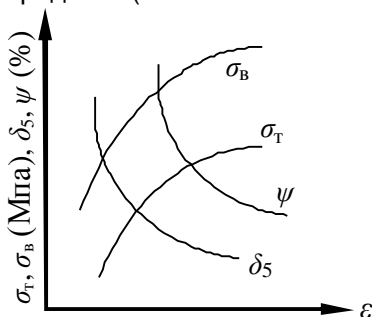
Изменения в металле, связанные с пластической деформацией

Наклепом называют явление увеличения прочностных и снижения пластических свойств в результате пластической деформации. Явление наклепа возникает в результате накопления дислокаций, поворота зерен в положение с более благоприятной ориентацией плоскостей скольжения, накопления обломков зерен и др.

В производственном процессе наклеп необходимо учитывать. Это:

- фактор, определяющий возможности оборудования;
- метод придания свойств. Наклеп позволяет регулировать механические свойства в широких пределах (возможность повышения прочности в 2–3 раза);
- фактор, определяющий выбор технологии.

Искажение решетки при наклепе влечет за собой накопление избыточной энергии, а всякая система стремится к минимуму энергии. Поэтому при длительном вылеживании **холоднодеформированного металла** происходит перестройка атомов,



приводящая к уменьшению энергии (снижается твердость, повышаются пластические свойства). Такое явление называют **отдыхом** или **возвратом**. Повышение температуры облегчает этот процесс.

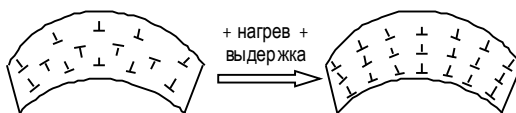
При нагреве возможны следующие явления в наклепанном металле:

- возврат;
- полигонизация;
- рекристаллизация.

Возврат – полное или частичное возвращение свойств к исходному уровню. Дислокации при этом не движутся, границы зерен не меняются, изменяется лишь концентрация точечных дефектов.

Полигонизация – процесс изменения механических свойств наклепанного металла, при котором происходит движение дислокаций в пределах малоугловых границ зерен. Полигонизация идет при высоких температурах (но ниже температуры рекристаллизации) и значительном времени выдержки.

В результате перераспределения дислокаций происходит образование очень тонкой субструктуры (с малой разориентацией зерен – мозаичная структура).



В процессе полигонизации границы зерен мигрируют за счет избыточной свободной энергии дислокации. В результате такой перестройки границ зерен нарушаются старые большеугловые границы и, если в этот момент охладить металл, то в нем зафиксируются новые границы зерен с малой разориентацией плоскостей скольжения в соседних зернах. То есть практически границы зерен отсутствуют, возникает мозаичная структура, которая является полупроницаемой для дислокаций. Такой металл обладает высокими и прочностными, и пластическими свойствами.

Контролируемая прокатка:

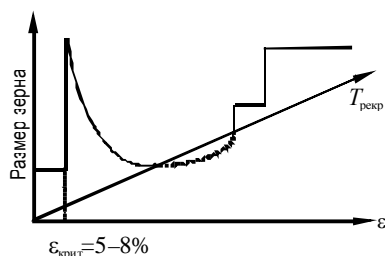
{ $\varepsilon = 50\%$ + выдержка при $t = 800^\circ\text{C}$ + закалка (после ножниц)}.

Рекристаллизация – процесс изменения механических свойств наклепанного металла, при котором происходит движение дислокаций в пределах большеугловых границ зерен. При этом происходит наиболее заметное понижение энергии за счет сокращения границ зерен (происходит объединение зерен). Рост зерен идет за счет *миграции границ!*

Зерна объединяются, при этом большеугловые границы остаются. Чем больше наклепан металл, тем больше энергии, тем полнее идет процесс рекристаллизации. При высоких температурах

рекристаллизации происходит снижение пластических свойств – за счет образования зерен больших размеров.

Существующая связь между размерами зерна в металле, степенью деформации и температурой последующей рекристаллизации показана на рисунке. При критической степени деформации происходит разрушение хрупких границ зерен, что приводит к их соприкосновению и интенсивному слиянию.



При горячей деформации одновременно идут два взаимно противоположных процесса: упрочнение (наклеп) и рекристаллизация. Конечный результат (механические свойства) зависит от соотношения скоростей этих процессов: V_n и $V_{рекр}$.

Горячая деформация – $T_{деф} = (0,7–0,9)T_{плавл} \rightarrow V_n = V_{рекр}$ – изменения свойств металла, вызванного упрочнением, не произойдет.

Неполная горячая деформация – $T_{деф} = (0,5–0,7)T_{плавл} \rightarrow V_n > V_{рекр}$.

Холодная деформация – $T_{деф} \leq 0,3T_{плавл} \rightarrow V_{рекр} = 0; V_n \neq 0$.

Факторы, влияющие на пластические свойства металлов

1. Химический состав

Наибольшей пластичностью обладают чистые металлы, наименьшей – химические соединения (больше сопротивление движению дислокаций).

Легирующие добавки *Cr, Ni, W, Co, Mo* – увеличивают пластичность; *C, Si* – снижают пластичность.

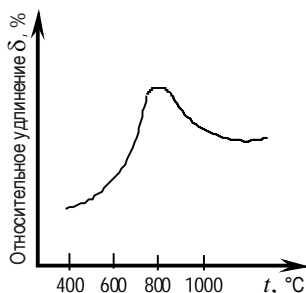
2. Микро-, макроструктура

С уменьшением величины зерна пластичность увеличивается (сверхпластичность). Разнородность зерен снижает пластичность.

3. Фазовый состав

Наибольшей пластичностью обладает металл однородного строения. Разные фазы, имеющие некогерентные решетки, затрудняют движение дислокаций и понижают пластичность. Кроме того, они деформируются по-разному, что способствует образованию трещин.

Снижение пластичности при температуре выше 800°C связано с образованием второй фазы – остаточного феррита. Повышение пластичности при темпе-



ратурах выше 1000°С свидетельствует о резком снижении сопротивления металла деформации.

4. Скорость деформации

Следует различать *скорость перемещения инструмента* или *скорость деформирования* (V , м/с) и *скорость деформации* – изменение степени деформации в единицу времени (u или $\dot{\epsilon}$, с⁻¹).

Для случая простого растяжения
$$u = \frac{\Delta l}{L \cdot t};$$

для случая осадки
$$u = \frac{2V}{H + h};$$

для случая прокатки
$$u = \frac{V \cdot \Delta h}{\sqrt{R\Delta h \cdot H}},$$

где L – базовая длина образца, подвергнутого растяжению; Δl – абсолютное удлинение образца $\Delta l = l - L$; t – время; V – скорость перемещения инструмента; H, h – высота тела соответственно до и после деформации; Δh – абсолютное обжатие $\Delta h = H - h$; R – радиус рабочих прокатных валков.

С увеличением скорости деформации пластичность снижается, так как не успевает переместиться нужное число дислокаций.

Увеличение пластичности при высоких скоростях деформации объясняется повышением температуры металла.



5. Окружающая среда

Некоторые поверхностно активные вещества повышают пластичность металла (олеиновая кислота) – облегчают пластический сдвиг, другие – способствуют хрупкому разрушению (керосин).

Таким образом, необходимо уделять должное внимание **смазкам**.

Прокатка в вакууме или в среде инертных газов редкоземельных элементов (Nb, Mo, Te) не позволяет образовываться окисной пленке, которая является очень хрупкой. При прокатке в вакууме газ диффундирует наружу и металл становится пластичным. В США построены цеха с защитной атмосферой. В г. Чирчик (Таджикистан) на металлургическом заводе работает прокатный стан с герметизированными валковыми узлами, в которых создан вакуум.

6. Дробность деформации

Увеличение дробности деформации приводит к повышению пластичности легированных марок стали.

Прокатка на планетарном стане, благодаря высокой дробности деформации, позволяет получить 98% степени деформации. Дробная деформация способствует уменьшению неравномерности структуры металла, облегчает поворот зерен. При повторном нагружении происходит снижение остаточных напряжений между зерном и пограничными зонами.

7. Механическая схема деформации

Наиболее благоприятной схемой пластической деформации является схема трехстороннего неравномерного сжатия. При прочих равных условиях уменьшение растягивающего напряжения благотворно влияет на пластические свойства металла.

При переходе от деформации по схеме одноосного растяжения к деформации по схеме трехстороннего сжатия теоретически возможно увеличение пластичности металла в 2,5 раза.

В классических опытах Кармана по прессованию мрамора и песчаника была получена величина степени деформации мрамора 68% без разрушения при обработке высоким гидростатическим давлением.

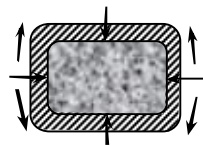
Гидростатическое давление

$$\sigma_{\text{ср}} = p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3,$$

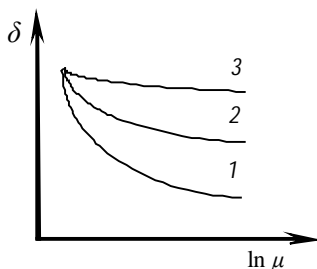
где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения сжатия.

Пластическая деформация возникает за счет разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T$.

При прокатке хрупких литых сплавов для снижения растягивающих напряжений на кромках применяют так называемую «рубашку» (перед прокаткой заготовку заворачивают в оболочку из высоко пластичного металла). При этом растягивающие напряжения возникают в оболочке, а деформируемый металл испытывает сжимающие напряжения, предотвращая трещинообразование.



Перспективным направлением является применение гидроэкструзии – создания всестороннего неравномерного сжимающего давления в деформируемом металле за счет жидкости (будет рассмотрено позже).



- 1 – волочение;
- 2 – прокатка;
- 3 – прессование

В реальных процессах **всегда** имеется неравномерность деформации (между зёрнами, между отдельными локальными участками), которая вызывает неравномерность деформации.

8. Масштабный фактор

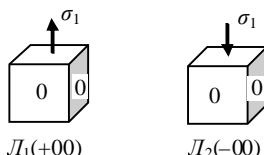
Чем больше объем тела, тем ниже его пластические свойства при прочих равных условиях – следует учитывать при разработке процессов ОМД и при проектировании оборудования.



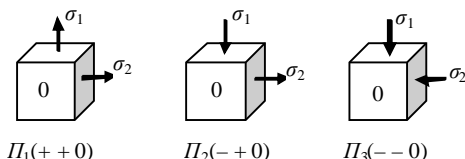
Раздел 2. ТРЕНИЕ И НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ

Трение при ОМД

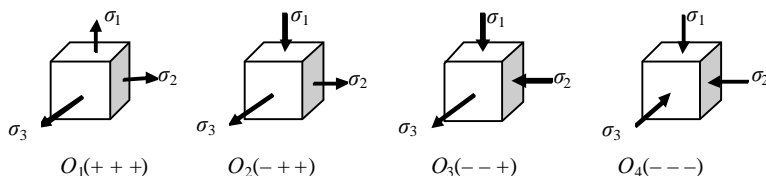
В процессе ОМД могут возникать 9 схем напряженного состояния. *Линейное напряженное состояние*



Плоское напряженное состояние



Объемное напряженное состояние



Хрупкое и пластические состояния вещества не являются неизменными его свойствами, а зависят от схемы напряженного состояния (опыты Кармана с мрамором с использованием гидростатического давления. Получена $\varepsilon_{\text{мрам}} = 75\%$ – сжатие и растяжение микротрещин).

Максимальная пластичность достигается при схеме напряженного состояния O_4 (прессование, прокатка). Схема O_1 в чистом виде не встречается, но могут быть локальные зоны – наихудшая пластичность.

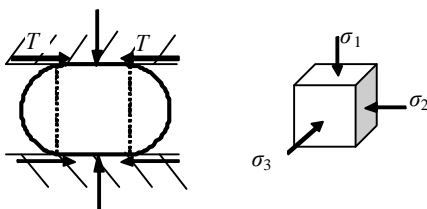
Наступление пластического состояния (переход металла в пластическое состояние) зависит от схемы напряженного состояния.

Условие пластичности:

- при линейном напряженном состоянии $\sigma_1 = \sigma_T$;
 - при плоском напряженном состоянии $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_T$;
 - при объемном напряженном состоянии $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_T$
- или $(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_T^2$.

Напряжение или сила в схеме напряженного состояния не всегда являются деформирующими усилиями инструмента. Чаще всего они являются сопутствующими силами и обусловлены технологическим процессом. **Основными технологическими факторами, определяющими величину деформирующего усилия инструмента и схему напряженного состояния в пластически деформируемом теле, являются внешнее или контактное трение и неравномерность деформации.**

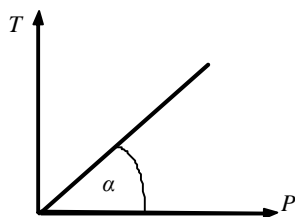
Процесс возникновения и преодоления сопротивления при сдвиге одного тела по поверхности другого называют **контактным или внешним трением**.



Над вопросами трения работал еще Леонардо (1500 г.).

Он установил, что трение зависит от вида контактирующих материалов (медь – сталь, стекло – мел). Установил, что даже если компоненты одинаковые, сила трения может быть различной. Все зависит от того, какое тело движется (если мел по стеклу – одна сила, если стекло по мелу – другая). Очень тонкие опыты, которые только в настоящее время нашли подтверждение.

Амонтон в 1699 г. предложил закон трения $T = fP$.



$$f = T/P = \operatorname{tg} \alpha$$

Объяснил природу трения механическим зацеплением неровностей поверхности.

В 1785 г. Кулон предложил молекулярную теорию трения и вновь открыл закон Амонтона

$$T = fP + A,$$

где A – сила молекулярного взаимодействия на площади контакта.

При $P = 0 \rightarrow T \neq 0$.

И в законе Амонтона, и в законе Кулона существенную роль играет коэффициент трения f .

По Дерягину

$$T = f(N + p_0 F),$$

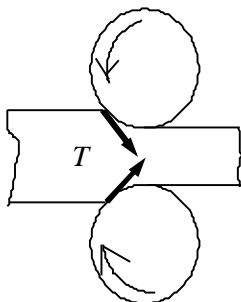
где N – нормальное усилие; p_0 – удельная сила прилипания, сцепления; F – истинная площадь контакта.

По Крагельскому

$$T = (\alpha + \beta q) F,$$

где α – константа трения, отражающая молекулярную природу; β – константа трения, отражающая механическое сцепление поверхностей; q – фактическое давление на контакте.

Разнообразие формул отражает то, что f коэффициент трения на самом деле – переменная величина, **функционал**, который зависит от скорости, температуры, давления и др.

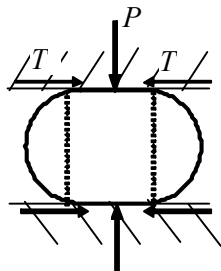


В процессах ОМД трение играет исключительно большую роль как положительную, так и отрицательную.

Без трения невозможно было бы осуществить захват металла валками при прокатке.

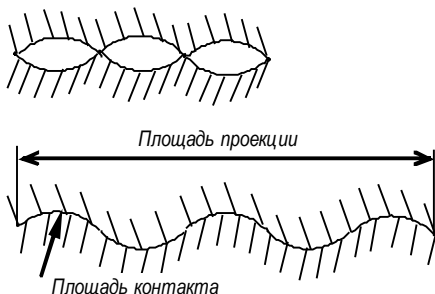
Но трение препятствует деформации металла, увеличивает давление, расход энергии, износ инструмента.

Например, при осадке усилие P должно преодолеть не только сопротивление металла пластической деформации, но и силы трения T .



Особенности внешнего трения при ОМД

Машиностроители различают два вида трения: качения и скольжения. При ОМД осуществляется трение скольжения, но оно существенно отличается от машинного скольжения.



- При машинном скольжении площадь контакта – доли процента; при ОМД – площадь контакта может быть больше площади проекции поверхности.
- При ОМД происходит обновление поверхности в результате выхода на поверхность новых, более чистых слоев в процессе деформации и вследствие того, что в очаг деформации поступает все новый и новый металл (прокатка).
- При больших давлениях возможно возникновение молекулярного сцепления поверхностей, вследствие чего происходит отрыв фрагментов поверхностных слоев деформируемого металла и налипание их на поверхность инструмента. Это увеличивает коэффициент трения, происходит сварка.
- Большие давления обуславливают:
 - улучшение микрогеометрии поверхности, сглаживание, срезание выступов и неровностей;
 - выдавливание слоя смазки из очага деформации и изменение условий трения.

Давление в узлах машин составляет 10–50 МПа; при горячей ОМД – 50–500 МПа; при холодной ОМД – 500–2500 МПа.

Виды трения при ОМД

Трение возникает в процессе взаимного перемещения металла и инструмента.

Различают:

- *граничное трение* – пленка тонкой смазки маломолекулярна, в ней не проявляются объемные свойства смазки;
- *сухое трение* – смазка отсутствует, есть окислы, грязь;
- *полусухое трение* – между трущимися участками есть участки, заполненные смазкой;
- *полужидкостное трение* – на контакте присутствует смазка, но есть отдельные участки трущихся поверхностей;
- *жидкостное трение* – поверхности контакта металла и инструмента полностью изолированы слоем смазки.

При ОМД имеют место *полусухое* и *полужидкостное* трение.

В свое время во ВНИИМетизе и на кафедре ОМД МГТУ были проведены работы по получению условий жидкостного трения при прокатке. При этом окружная скорость валков должна быть очень высокой – от действия смазки возникают мощные растягивающие напряжения, что приводит к трещинообразованию; отсутствует захват металла валками.

Факторы, влияющие на величину контактного трения

1. Состояние поверхности рабочего инструмента

Чем меньше шероховатость инструмента, тем меньше трение. Используется фактор довольно гибко. В случае *горячей прокатки*, чтобы улучшить условия захвата и обжатие за проход, поверхность валков закругляют, увеличивая ее шероховатость (делают насечку, наплавку). При *холодной прокатке*, когда давление металла на валки велико за счет высокого предела текучести, и еще необходимо преодолевать контактные силы трения, прокатные валки шлифуют, полируют с целью снижения коэффициента трения. Захват металла при этом может не происходить, и прокатку ведут за счет приложения переднего натяжения.

2. Состояние поверхности деформируемого металла – влияет только в первый момент деформации, в дальнейшем зависит от состояния поверхности инструмента (принимает его шероховатость).

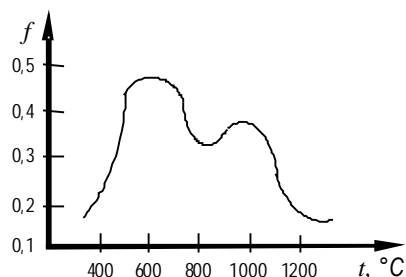
Важную роль играет окалина. При горячей прокатке она иногда играет роль смазки, а иногда – насечки (увеличивается трение). При холодной прокатке окалина **всегда** способствует увеличению трения.

Чем чище поверхности контактирующих тел, тем выше коэффициент трения (f), так как тонкие пленки окислов не парализуют силы молекулярного сцепления. При прокатке в вакууме $f > 0,5$.

3. Химический состав

Данные противоречивы. Углерод и хром понижают коэффициент трения, марганец – повышает f .

По данным Северденко f сложнoleгированных сталей ниже при низких температурах и выше – при высоких.



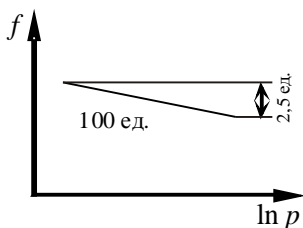
4. Температура деформации

По данным Северденко В.П. f увеличивается за счет окисления поверхности металла (первый максимум). С дальнейшим повышением температуры происходит размягчение окалины и она играет роль смазки. Образование второго максимума объясняется

структурными изменениями в окалине с образованием Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO . При температуре свыше $1000^\circ C$ резко возрастает пластичность металла – податливость силам среза (срезаются микронеровности).

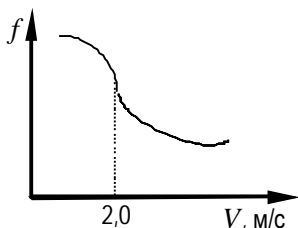
5. Давление (p) на поверхности металла

Данные противоречивы. Объясняется это тем, что не установлена закономерность между изменениями состояния контактных поверхностей и f . С одной стороны увеличение p приводит к сглаживанию всех неровностей и уменьшению f . С другой стороны, увеличение $p_{ср}$ приводит к увеличению площади контактных поверхностей, разрушению слоев смазки и взаимодействию чистых поверхностей металла и инструмента – возрастают молекулярные силы взаимодействия, f растет.



6. Скорость относительного смещения

С уменьшением скорости деформирования увеличивается коэффициент трения. Эту зависимость используют при прокатке: с увеличением f при уменьшении скорости прокатки увеличивается угол захвата и обжатие за проход – для обеспечения надежного захвата металла валками его производят со скоростью не более 2 м/с .



Разнообразие факторов, влияющих на f , нашло отражение в эмпирических формулах (Финкельштейн Я.С. Справочник по прокатному и трубному производству. – М.: Металлургия, 1975. С. 26–27.).

Формула Эжелунда – Формула Б.П. Бахтинова

$$f = \kappa_1 (1,05 - 0,0005t); \quad f = \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 (1,05 - 0,0005t),$$

где κ_1 – коэффициент, учитывающий материал валков ($\kappa_1=0,8-1,0$); κ_2 – коэффициент, учитывающий, скорость прокатки; κ_3 – коэффициент, учитывающий, марку стали ($\kappa_3=1,0-1,6$).

Формула Л.Ф. Молоткова

$$f = 0,748(\% C \cdot 10)^{-0,493} - k \left(1 - 0,25 \frac{1200 - t}{100} \right),$$

где $k \cdot 100 = 27 \cdot 23^{e^{-0,27(\% C \cdot 10)}}$; e – основание натурального логарифма.

Формула Ю.М. Чижикова

$$f = \alpha \tau m (0,005t - 0,006e^{0,005t}),$$

где α – коэффициент, учитывающий влияние состава материала валков; τ – напряжение трения; m – коэффициент, учитывающий влияние состава прокатываемой стали.

Формула Ш. Гелеи (при температуре прокатки более 700°C)

$$f_3 = \kappa_1 (1,05 - 0,0005t) - 0,056V,$$

где κ_1 – коэффициент, учитывающий материал валков ($\kappa_1=0,9-1,0$); V – окружная скорость валков (не более 5,0 м/с).

Формула Н.Н. Гета

$$f = 0,55 - 0,00024t.$$

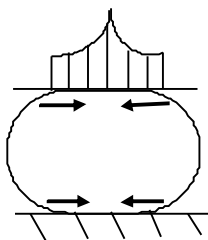
Формула А.П. Грудева

$$f = k \left[0,07 - \frac{0,1V^2}{2(1+V) + 3V^2} \right],$$

где V – окружная скорость валков; k – коэффициент, учитывающий влияние смазки ($k=0,9-1,55$).

Роль сил трения в процессах ОМД

Внешнее трение, развивающееся на поверхности контакта, оказывает большое влияние на весь процесс деформации.

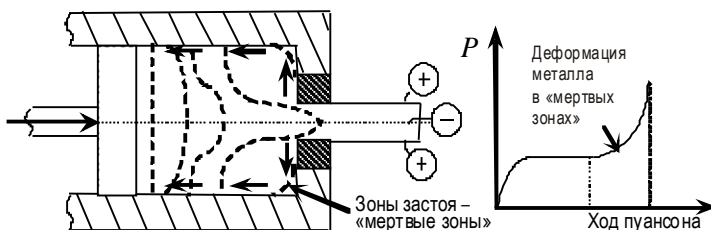


1. *Определяет напряженное состояние и сопротивление деформации.* Суммируясь с основными напряжениями от внешней приложенной нагрузки, обуславливает неравномерное распределение напряжений по объему деформируемого тела. Это обуславливает неравномерное распределение давлений по поверхности контакта и значительно увеличивает сопротивление деформации.

2. *Определяет деформированное состояние.* Неравномерность напряженного состояния обуславливает и неравномерность деформированного состояния по объему тела. Что, в свою очередь, обуславливает неоднородность структуры и механических свойств деформируемого металла. Это может привести к появлению трещин и браку.

Наличие сил трения может существенно ухудшить деформируемость металла.

Процесс прессования – металл значительно хуже деформируется из-за наличия больших удельных сил трения. Это обуславливает сам ход технологического процесса. Процесс прессования не доводят до конца из-за резкого повышения усилия прессования при деформации металла, находящегося в «мертвых зонах», остается «прессостаток». Ликвидировать «мертвые зоны» можно, сделав конусную матрицу, но при этом качество поверхности готового изделия будет хуже – в него попадут дефекты заготовки.



3. Ухудшают условия службы инструмента. Уменьшается срок службы. Это предъявляет особые требования к инструменту.

4. Ухудшает качество поверхности готовых изделий. Ухудшение качества инструмента приводит к ухудшению качества готовых изделий.

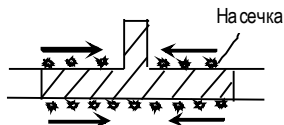
Для снижения сил трения используют смазку, для увеличения – насечку. При этом изменяется шероховатость поверхности изделия.

Смазка и смазочные материалы

Для уменьшения влияния сил внешнего трения в очаг деформации вводят слой смазки. В зависимости от способа ОМД и требований к качеству продукции смазка может преследовать следующие цели:

- 1) уменьшение трения с целью понижения сопротивления деформации. Особенно важно при холодной обработке тонких изделий с сильно развитой поверхностью контакта (прокатка, волочение);
- 2) уменьшение износа инструмента. Особенно нежелателен износ инструмента в чистовых проходах, что приводит к искажению профиля (холодная прокатка, волочение, штамповка, прессование);
- 3) обеспечение требуемой поверхности изделия. Смазка предупреждает образование шероховатости и обеспечивает получение изделия с блестящей или матовой поверхностью;

- 4) регулирование температуры инструмента и металла. Трение способствует разогреву инструмента и металла, что способствует выходу из строя инструмента и ухудшению свойств металла. Смазка обеспечивает охлаждение;
- 5) контроль формоизменения. Форма изделий зависит от условий трения. Смазка способствует скольжению, растеканию металла, отсутствию ее – тормозит скольжение. Например, прокатка тавра. Чтобы запрессовать металл в узкую щель, поверхность валков насекают.



Смазка обычно одновременно решает все задачи, но ее модификации (состав) могут акцентировать одну из задач.

Обычно все требования не могут быть удовлетворены одновременно, поэтому при выборе смазки необходимо учитывать, какую цель, в первую очередь, необходимо достичь:

- *свободная ковка, прокатка* – в горячем состоянии усилие деформирования невелико. Поэтому обработка проводится без смазки. Окалина препятствует привариванию металла к инструменту;
- *горячая штамповка* – для увеличения срока службы дорогостоящего инструмента и уменьшения усилия при штамповке деталей с тонкими элементами необходимо применение смазки (цели 2, 5);
- *горячее прессование* – характеризуется высоким сопротивлением деформации (большие силы трения), поэтому применение смазки желательно, особенно при прессовании труб и фасонных сечений (цели 1, 2);
- *холодная прокатка* – смазка необходима для уменьшения сопротивления деформации, для охлаждения валков и получения высокого качества изделий (цели 1, 2, 3);
- *волочение* – производится в холодном состоянии при больших скоростях, что вызывает разогрев инструмента и металла. Смазка нужна для охлаждения и увеличения срока службы инструмента, повышения качества поверхности готовых изделий (цели 2, 3, 4).

Требования, предъявляемые к смазкам:

- 1) максимальное снижение коэффициента трения;
- 2) образование прочной пленки, обеспечивающей надежное разделение поверхностей обрабатываемого изделия и инструмента;
- 3) хорошая прилипаемость;
- 4) стабильность смазок, стойкость к высоким температурам, не-разложение под действием определенной среды;

- 5) легкость удаления по окончании деформации;
- 6) отсутствие вредных для здоровья людей веществ;
- 7) хорошая теплопроводность, охлаждающая способность;
- 8) низкая стоимость.

При горячей деформировании смазка должна противостоять высоким температурам не выгорая, не должна оставлять на поверхности трудноудаляемых остатков. Обычно используют *жидкое стекло, водные и масляные смазки с наполнителями в виде графита, талька, мела.*

При холодной деформации смазка должна интенсивно понижать коэффициент трения и являться хорошей охлаждающей средой. Используют *водные эмульсии масел с добавками, которые обеспечивают хорошее сцепление смазки с поверхностью металла.* Разрыв пленки смазки приводит к непосредственному контакту металла с инструментом и схватыванию, а в последствии – к налипанию металла на инструмент.

Схватывание – образование металлических связей при сближении на расстояние $< 10\text{Å}$ ($1\text{Å} = 10^{-10}$ см) при отсутствии на поверхности пленок.

Хорошая прилипаемость смазок на цинк, медь, свинец, хуже – на сталь, алюминий. Поэтому перед холодным волочением осуществляют подготовку поверхности катанки или проволоки (меднение, желтение $\{Fe(OH)_3\}$ – гидрат окиси железа), фосфатирование, известкование).

Виды смазок

Различают:

- *твердые смазки* – известковые, фосфатные, металлические покрытия (подсмазочный слой, применяются при волочении), графит, мел;
- *густые смазки* – животные и растительные жиры, минеральные масла, мыла;
- *жидкие смазки* – эмульсии водно-мыльные и водно-масляные.

Граничные условия

При решении ряда задач теории ОМД необходимо знать граничные условия на поверхности контакта металла с инструментом. Обычно их задают в виде предполагаемого закона изменения касательных напряжений на поверхности контакта. Трение на поверхности контакта не постоянно, могут возникать различные условия взаимного перемещения между металлом и инструментом:

- скольжение;
- торможение;
- прилипание.

Для случая осадки: центральная зона – зона прилипания, средние – зоны торможения, крайние участки – зоны скольжения.

Контактные напряжения в этих зонах определяются следующими соотношениями:

– область скольжения

$$\tau = f \sigma.$$

Металл скользит по поверхности инструмента.

– область торможения

$$\tau = f \sigma_T \quad (f = 0,5),$$

где σ_T – сопротивление металла деформации.

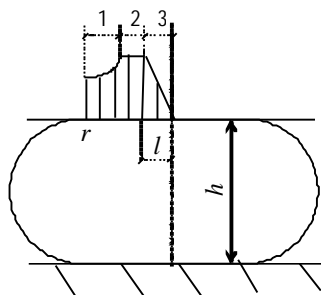
В этом случае скольжение может идти как внутри металла, так и на контакте;

– область прилипания

$$\tau = 0,5 \sigma_T l / r,$$

где r – расстояние от нейтральной точки, где нет и не может быть движения, до центра осаживаемого тела; l – протяженность зоны прилипания (по экспериментальным данным $2l \approx 2h$, h – высота осаживаемого тела).

Здесь отсутствует скольжение металла по поверхности инструмента. Сдвиговые деформации идут внутри деформируемого тела.



1 – зона скольжения;
2 – зона торможения;
3 – зона прилипания.

Методы определения коэффициента трения

Правильно определить контактные напряжения и коэффициент трения можно только в условиях рассматриваемых процессов ОМД.

Прямое измерение сил контактного трения, по которым определяют коэффициент трения.

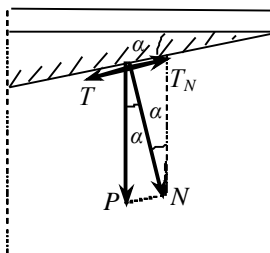
Косвенный метод – определение какого-либо параметра процесса, по которому определяют коэффициент трения.

Первая группа методов основана на том, что с помощью измерительной аппаратуры (точечные месдозы, торсиометры и др.) измеряют в каждой точке поверхности контакта величины нормальных и касательных напряжений, по которым определяют коэффициент трения. Эти методы требуют сложной дорогой измерительной техни-

ки, которая может быть использована только в лабораторных условиях и не воспроизводит полностью производственных условий.

Вторая группа методов основана на том, что в лабораторных или производственных условиях определяют величину какого-либо параметра (сопротивление деформации, величину деформации, скорость скольжения и др.), связанного с коэффициентом трения математической зависимостью. Эти методы менее точны.

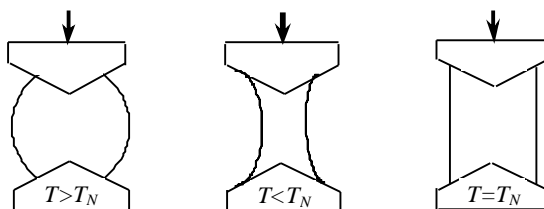
А. Метод конусных бойков при осаживании



N – нормальное давление инструмента;

$P = \frac{N}{\cos \alpha}$ – вертикальная составляющая давления;
 $T_N = N \cdot \operatorname{tg} \alpha$ – касательная составляющая силы нормального давления;
 $T = Nf$ – сила трения

Имея набор конусных бойков с разными углами конусности и соответствующие им образцы с коническими выточками, определяют угол конусности α , при котором для данной пары трения в процессе осаживания сохраняется цилиндрическая форма образца. При этом касательная составляющая нормального давления бойка T_N уравновешивает силу трения T .



Если боковая поверхность образца не искажается, значит касательная составляющая силы нормального давления уравновешивает силу трения.

$$Nf = N \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad f = \operatorname{tg} \alpha.$$

Метод громоздкий и не отличается большой точностью, так как имеет место неоднородность деформированного состояния.

Б. Метод осаживания двух образцов

Два образца с различным отношением d/h осаживают с одинаковой степенью деформации ($\varepsilon = \text{const}$), графическим путем определяют сопротивление металла деформации (σ_T). Затем определяют коэффициент трения (f), используя формулу Зибеля:

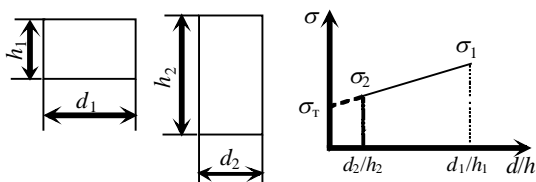
$$\sigma_1 = \sigma_T \left(1 + f \frac{d_1}{h_1} \right); \quad \sigma_2 = \sigma_T \left(1 + f \frac{d_2}{h_2} \right);$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_T f \left(\frac{d_1}{h_1} - \frac{d_2}{h_2} \right); \quad f = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_T (d_1/h_1 - d_2/h_2)}.$$

σ_1 и σ_2 определяют экспериментально (по прибору);

σ_T – определяют графическим путем (см. рисунок).

($\sigma = p = P/F$, здесь p – давление металла на инструмент).



Достоверность метода определяется тем, насколько верно формула Зибеля отражает зависимость удельного давления от условий трения.

В. Определение коэффициента трения при прокатке

(Метод предельного угла захвата)

Определяется наибольшее обжатие, которое можно получить при естественном захвате полосы валками.

$$f = \operatorname{tg} \alpha_{\max}.$$

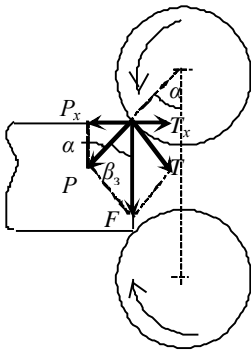
Для осуществления процесса прокатки необходим захват металла валками. В начальный момент захвата в точках соприкосновения металла с валками действуют сила нормального давления P и сила трения

$$T = P f_{\text{захв}},$$

где $f_{\text{захв}}$ – коэффициент трения при захвате.

Горизонтальные составляющие этих сил P_x – отталкивающая сила и T_x – втягивающая сила – направлены в противоположные стороны.

$$T_x = T \cos \alpha = P f \cos \alpha;$$



$$P_x = P \sin \alpha;$$

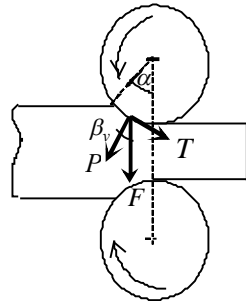
$$P f \cos \alpha = P \sin \alpha;$$

$$f = \operatorname{tg} \alpha$$

При естественном захвате существует равновесие сил P_x и T_x , результирующая сил P и $T - F$ — направлена вертикально вниз, тогда угол захвата α равен углу трения при захвате β . Эти силы будут находиться в равновесии при условии $\alpha = \beta_3$.

$$f_3 = \operatorname{tg} \alpha_{\max}; \alpha > \beta_3.$$

При установившемся процессе прокатки P — равнодействующая сил нормального давления, распределенных вдоль очага деформации. Равновесие сил при этом достигается при $\alpha = 2\beta$.



$$f_y = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

При установившемся процессе прокатки коэффициент трения можно определить:

– по давлению

$$P = \beta \sigma_r \frac{2h}{\Delta h (\delta - 1)} \frac{h_\gamma}{h} \left[\left(\frac{h_\gamma}{h} \right)^\delta - 1 \right],$$

где $\delta = \frac{2fL}{\Delta h}$; L — длина дуги захвата;

– по уширению (формула Б.П. Бахтинова)

$$\Delta b = 0,575 \frac{\Delta h}{H} \left(\sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right);$$

$$f = \frac{0,575 \Delta h^2}{2H \left(0,575 \frac{\Delta h}{H} \sqrt{R \Delta h} - \Delta b \right)};$$

– торможением полосы в валках

$$\beta_y = \arctg \frac{Q}{2P} + \frac{\alpha}{2}; \quad f = f \cdot \operatorname{tg} \beta_y; \quad f_y = \frac{Q}{2P} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2};$$

– при пробуксовке полосы в валках (метод крутящего момента)

$$f = \frac{M}{RP}; \quad f = \frac{M/RP \cdot \sin \alpha / \alpha}{1 - \frac{M}{RP} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{R}},$$

где M – момент прокатки; P – нормальное усилие; R – радиус вала; α – угол захвата.

Неравномерность деформации при ОМД

Как известно из прошлых лекций, основными технологическими факторами, определяющими схему напряженного состояния в пластически деформируемом теле, являются контактное трение и неравномерность деформации.

В процессах ОМД деформация **всегда неравномерна!** То есть в объеме деформируемого тела различные участки деформируются неодинаково.

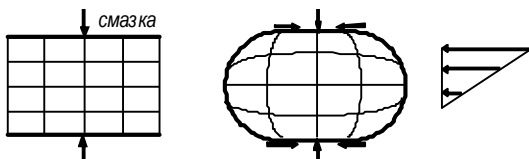
Равномерность деформации возможна при соблюдении ряда условий:

- одинаковые напряжения во всех точках деформируемого тела;
- отсутствие трения на контактной поверхности;
- одновременная деформация всего тела;
- изотропные свойства деформируемого тела.

Отсюда **причины, обуславливающие неравномерность деформации** (по И.М. Павлову):

- наличие сил контактного трения;
- несоответствие формы инструмента и деформируемого тела;
- неоднородность свойств обрабатываемого материала;
- особый характер приложения нагрузки (изгиб, кручение);
- наличие остаточных напряжений в теле.

1. **Внешнее трение** – препятствует течению металла по контактной поверхности.

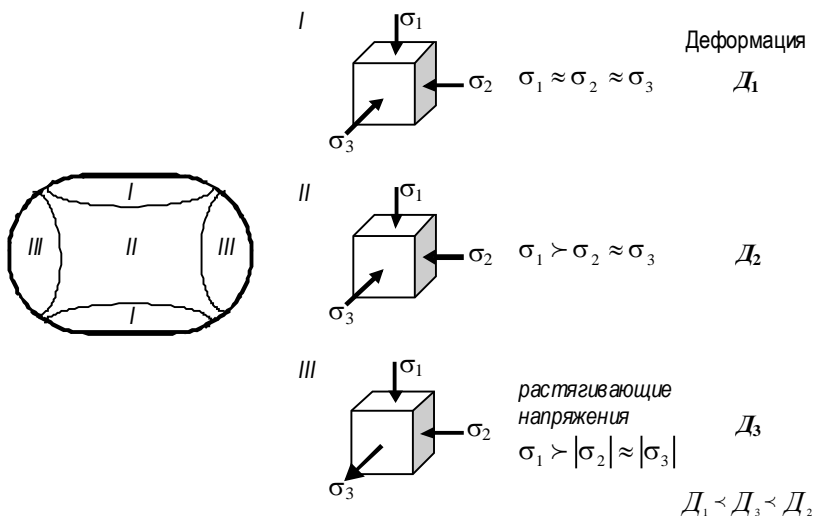


К поверхности контакта примыкают зоны затрудненной деформации, которые распространяются в глубь тела на некоторую ве-

личину. В этих зонах всестороннее сжатие выражено наиболее сильно, и металл обладает наиболее высоким сопротивлением деформации.

Внешнее проявление неравномерности деформации – бочкообразование осаживаемого тела. От трения зависит схема напряженного состояния, а от нее – пластичность и деформируемость стали.

В общем случае при осадке цилиндрического тела можно выделить три зоны с различной деформируемостью.



В первой зоне разность между напряжениями незначительна и может не отвечать условию пластичности, хотя сами напряжения (уровень) велики.

В третьей зоне сдерживающее влияние сил трения такое же, как во второй зоне, но схема напряженного состояния другая (имеется напряжение растяжения), что снижает пластические свойства и ухудшает деформируемость осаживаемого тела.

Схема напряженного состояния влияет на усилие деформации.

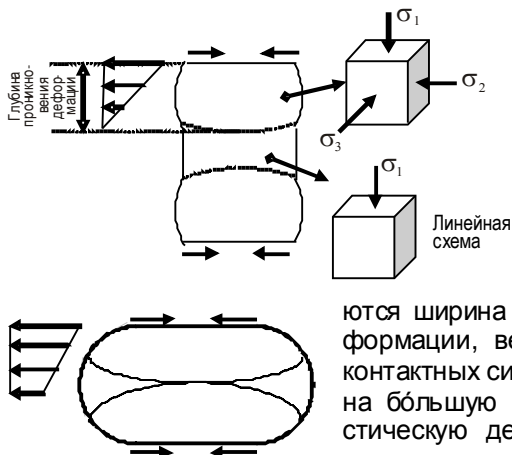
Пример (по С.И. Губкину). Два одинаковых медных образца деформируем методом волочения (1) и методом прессования (2).

Коэффициент вытяжки $\mu = \left(\frac{D}{d}\right)^2 = 1,56$. То есть $D_1 = D_2$ и $d_1 = d_2$. При

этом *усилие волочения* (при наличии растягивающих напряжений) составляет $P_1 = 10500$ Н (давление $p_1 = 210$ Н/мм²), а *усилие прессования* (схема всестороннего неравномерного сжатия) $P_2 = 35200$ Н (давление $p_2 = 705$ Н/мм²).

Степень неравномерности деформации зависит и от того, насколько развита контактная поверхность по отношению к объему деформируемого тела. При прокатке листа и осадке эти отношения выражают через F/H . Чем больше F/H , тем меньше неравномерность деформации.

Особенно резко неравномерность деформации проявляется при деформации высоких тел (например, прокатка на блюминге, осадка высокого цилиндрического образца с небольшим диаметром). В этом случае наблюдается двойное бочкообразование.



В центральную часть слитка деформация не проникает вообще. Очень сильно выражена неравномерность деформации (в центре возникают дополнительные напряжения растяжения). Но при увеличении контактной поверхности (увеличиваются

ширина заготовки, длина очага деформации, величина обжатия) влияние контактных сил трения будет сказываться на большую глубину, вызывая там пластическую деформацию и уменьшение неравномерности деформации. Таким

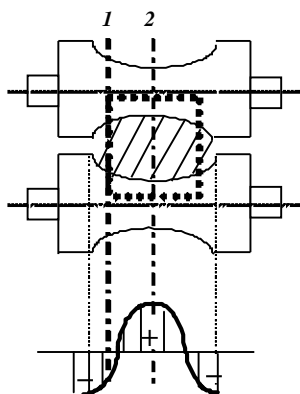
образом, *контактное трение может играть положительную роль с точки зрения глубины проникновения деформации.*

На практике несоответствие площади контакта к объему деформируемого тела может привести к разрушению металла (разрывы внутри заготовки – скворечники). Они образуются за счет дополнительных растягивающих напряжений во внутренних слоях, возникающих из-за неравномерности деформации (в большей степени удлиняются поверхностные, деформируемые слои металла). При этом в поверхностных слоях заготовки возникают дополнительные напряжения сжатия.

2. *Несоответствие формы инструмента и деформируемого тела*

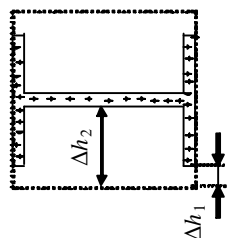
Во многих случаях форма инструмента отличается от формы исходной заготовки. Если заготовку представить в виде узких полосок металла, то каждая из них будет удлиняться пропорционально своему обжатию по высоте μ_{\max} – в 1 сечении, μ_{\min} – во 2 сечении.

Но так как заготовка – монолитная, то $\mu_{\text{факт}} = F_0/F_1$, и эта вытяжка будет средней: $\mu_1 > \mu_{\text{факт}} > \mu_2$.



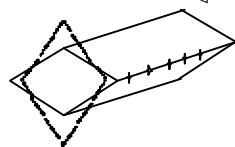
Металл первого сечения стремится к удлинению, но удерживается соседними зонами, и в нем возникают дополнительные сжимающие напряжения. Металл второго сечения получает дополнительные растягивающие напряжения. Возникновение дополнительных напряжений из-за неравномерности деформации может привести к изменению формы, размеров и разрушению продукции.

При прокатке двутавра интенсивное удлинение стенки ($\Delta h_2 > \Delta h_1$) приводит к



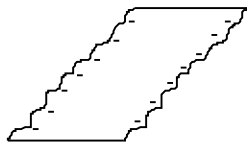
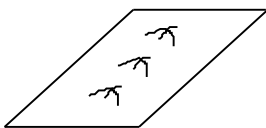
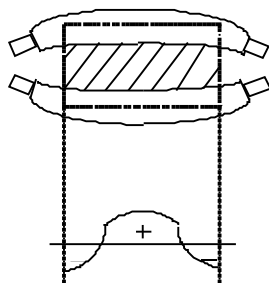
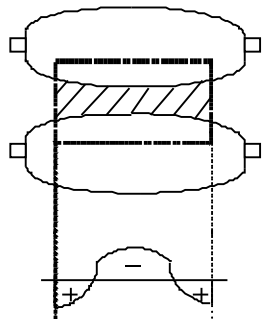
тому, что она растягивает фланцы по длине и производит их утяжку по ширине профиля, то есть уменьшает высоту фланцев, что необходимо учитывать при расчете калибровки валков.

При прокатке заготовки ромбического сечения в квадратном калибре деформация средних слоев больше, чем крайних (по горизонтальной плоскости сечения), что приводит к появлению растягивающих напряжений на ребре (оно более холодное) и появлению трещин.



Тепловая выпуклость валка приводит к неравномерной деформации листа и дефекту «коробоватость».

Изгиб валков в результате больших нагрузок или их износ приводит к неравномерной деформации листов и дефекту «волнистость».



Изгиб валков необходимо учитывать либо исходной профилировкой валков, либо устройством оперативного вмешательства в конфигурацию зазора между валками.

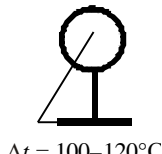
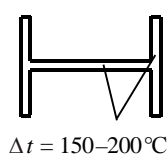
3. Неоднородность свойств деформируемого тела

Причины неоднородности:

– *неоднородность химического состава стали*. В 20-титонном слитке СтЗкп (данные ЦНИИЧМ) при среднем содержании углерода 0,15%, содержание в отдельных объемах колеблется в пределах 0,07–0,35%. Чем больше масса слитка, тем выше химическая неоднородность. Такая неоднородность химического состава сохраняется вплоть до получения готового профиля;

– *структура металла* – неоднородна. В слитке имеются три зоны: наружная (мелкие кристаллы), средняя (столбчатые кристаллы), внутренняя (крупные равноосные кристаллы). Величина зерна зависит от степени предыдущей деформации;

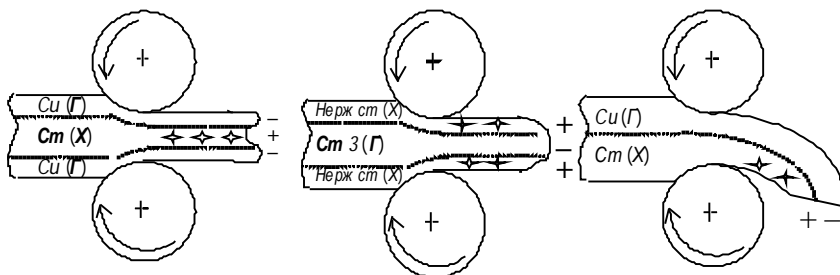
– *разница температур по сечению деформируемой заготовки*. Нагрев металла перед прокаткой считается нормальным, если $\Delta t = 20\text{--}50^\circ\text{C}$. Но из-за недостаточной мощности нагревательных средств разность температур в центре и на поверхности заготовки может быть больше. Разность температур может возникать в результате сложности формы тела, отдельные элементы которого после горячей деформации будут охлаждаться с разной скоростью. Например, разность температур на фланцах и стенке двутавровой балки может достигать $\Delta t = 150\text{--}200^\circ\text{C}$, а в подошве и головке рельсов – $\Delta t = 100\text{--}120^\circ\text{C}$;



результате сложности формы тела, отдельные элементы которого после горячей деформации будут охлаждаться с разной скоростью. Например, разность температур на фланцах и стенке двутавровой балки может достигать $\Delta t = 150\text{--}200^\circ\text{C}$, а в подошве и головке рельсов – $\Delta t = 100\text{--}120^\circ\text{C}$;

– *деформация биметалла*. Аналогично будет вести себя при пластической деформации неравномерно нагретая заготовка.

Обычно в результате неравномерной деформации в теле возникают дополнительные остаточные напряжения.



Закон дополнительных напряжений

При неоднородном формоизменении размеров тела в слоях и элементах тела, получающих большую степень изменения размеров, возникают напряжения, знак которых отвечает уменьшению размеров (напряжения сжатия), а в слоях и элементах тела, получающих меньшую степень изменения размеров, возникают напряжения, знак которых отвечает увеличению его размеров (напряжения растяжения).

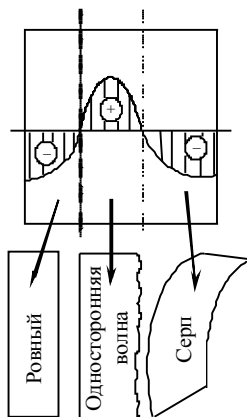
Эти напряжения имеют характерные признаки, отличающие их от основных деформирующих напряжений:

- возникают в результате неравномерной деформации;
- взаимно уравниваются внутри деформируемого тела. Это значит, что равнодействующая всех напряжений сжатия равна равнодействующей всех напряжений растяжения. Сами напряжения растяжения и сжатия могут быть не равны по величине;
- по окончании деформации остаются в теле, что необходимо учитывать в процессе производства и эксплуатации изделий.

Внутренние взаимно уравновешенные напряжения принято делить на группы:

- напряжения первого рода уравниваются между отдельными слоями тела, в пределах всего объема или большей его части;
- напряжения второго рода уравниваются в пределах небольшого объема (несколько зерен);
- напряжения третьего рода – уравниваются в пределах одного зерна.

Напряжения второго и третьего рода являются следствием самой пластической деформации.

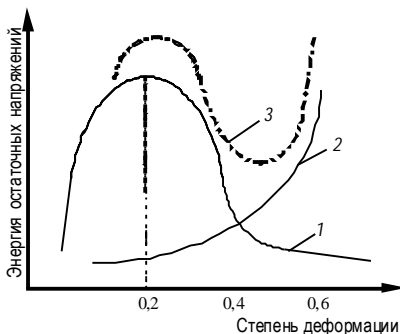


Особенно опасны остаточные напряжения в наружных слоях тела, так как ухудшают его работоспособность. Поэтому производят специальную обработку поверхности: обкатку, выглаживание, дробеструйную обработку, дрессировку, вызывающую в поверхностных слоях тела сжимающие напряжения для нейтрализации растягивающих напряжений, возникающих в процессе эксплуатации изделий.

Полное снятие остаточных напряжений достигается термической обработкой. Интересно поставлена задача использования остаточных напряжений и их целенаправленного наведения в листовом прокате в Японии (для последующей штамповки). Путем прокатки в нужном месте наводят внутренние остаточные напряжения определен-

ной величины и знака, которые, суммируясь с напряжениями в результате штамповки, улучшают деформируемость металла.

Таким образом, задачей разработки (проектирования) режимов деформации в процессах ОМД является **управление неравномерностью деформации**: сознательно накладывая одну неравномерность деформации на другую, получают возможно более равномерную деформацию по всему объему деформируемого тела.



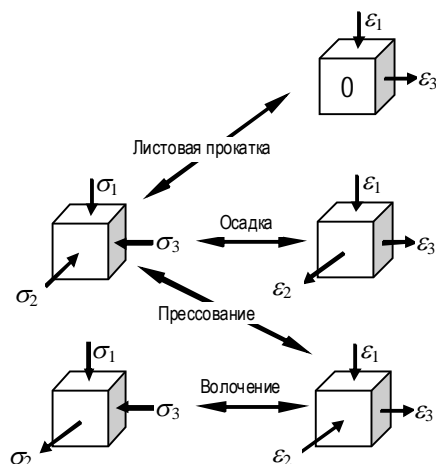
1 – кривая напряжений первого рода;
2 – кривая напряжений второго и третьего рода;
3 – общая энергия (для случая волочения по С.И. Губкину)

Раздел 3. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ ОМД

Формоизменение при ОМД

Формоизменение – **основная цель ОМД** – процесс, состоящий в непрерывных переходах от одной формы поверхности к другой, бесконечно мало отличной от предыдущей.

Формоизменение при ОМД связано с пластической деформацией, которая вызвана напряженным состоянием.



Любой процесс ОМД можно описать с помощью механической схемы деформации. Совокупность схем главных напряжений и главных деформаций называют **механической схемой деформации** (по Губкину С.И.).

Следует отметить, что при одинаковой схеме напряженного состояния схемы деформаций могут быть различны, а одинаковые схемы деформаций могут быть вызваны различными схемами напряжений.

Величины, характеризующие деформацию тел (показатели формоизменения)

При ОМД имеют дело с большими деформациями, что связано с начальными и конечными размерами тела.

1. Абсолютная деформация

$$\Delta h = H - h; \quad \Delta b = b - B; \quad \Delta l = l - L.$$

Может быть как положительной, так и отрицательной в зависимости от того, происходит увеличение или уменьшение размера деформируемого тела.

Является важной, но несравнимой характеристикой тела, так как зависит от начальных размеров.

2. Относительная деформация

– *первого вида* – отношение абсолютной деформации к первоначальному размеру тела:

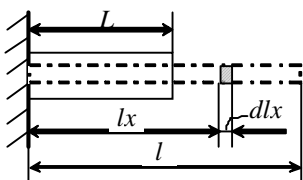
$\varepsilon_H = \Delta h/H$; $\varepsilon_B = \Delta b/B$; $\varepsilon_L = \Delta l/L$ – показатели могут быть выражены в процентах.

Отрицательная деформация изменяется в пределах 0–1,0; положительная – 0– ∞ ;

– *второго вида* – отношение абсолютной деформации к конечному размеру тела:

$\varepsilon_h = \Delta h/h$; $\varepsilon_b = \Delta b/b$; $\varepsilon_l = \Delta l/l$ – показатели могут быть выражены в процентах.

Отрицательная деформация изменяется в пределах 0– ∞ ; положительная – 0–1,0. Тогда положительная деформация $\Delta b/B > \Delta b/b$ и $\Delta l/L > \Delta l/l$, а отрицательная деформация $\Delta h/h > \Delta h/H$.



Процессы протекают во времени, в течение которого размеры тела меняются, поэтому правильнее всего относительную деформацию характеризовать деформацией *третьего вида* или *действительной деформацией*.

В каждый данный момент деформации относительная деформация равна dl_x/l_x , где dl_x – абсолютно малое изменение размера тела в рассматриваемый момент времени; l_x – размер тела в тот же момент времени ($L < l_x < l$).

Тогда полная деформация по длине образца за весь процесс составит

$$\delta = \int_L^l \frac{dl_x}{l_x} = \ln l_x \Big|_L^l = \ln \frac{l}{L}.$$

Таким образом,

$$\delta_1 = \ln \frac{h}{H}; \quad \delta_2 = \ln \frac{b}{B}; \quad \delta_3 = \ln \frac{l}{L}.$$

Действительные главные деформации корректно характеризуют величину деформации, учитывая знак.

Пример. Прокатка за пять проходов.

Исходные данные	Параметр	Номер прохода					Суммарная деформация, %
		1	2	3	4	5	
Абсолютная деформация	H	100	90	80	70	60	
	h	90	80	70	60	50	
	Δh	10	10	10	10	10	
Относительная деформация первого вида	$\Delta h/H, \%$	10,0	11,1	12,5	14,3	16,7	64,6
	Суммарный подсчет, $\Delta h/H, \%$	$\varepsilon_H = 50 / 100 = 50$					
Относительная деформация второго вида	$\Delta h/h, \%$	11,1	12,5	14,3	16,7	20,0	74,6
	Суммарный подсчет, $\Delta h/h, \%$	$\varepsilon_h = 50 / 50 = 100$					
Действительная деформация третьего вида	$\ln(h/H), \%$	10,6	11,7	13,3	15,2	18,0	68,8
	Суммарный подсчет, $\ln(h/H), \%$	$\delta_1 = \ln(50/100) = 68,8$					

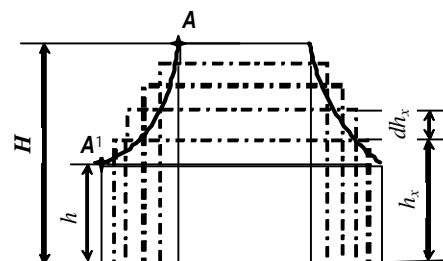
Относительная действительная деформация обладает свойством аддитивности, то есть при выполнении деформации в несколько этапов с целью определения суммарной деформации ее результаты можно складывать.

Расхождение между истинными δ и относительными ε деформациями при изменении ε от 5,0 до 20% составляет 2–10%, то есть приемлемо для инженерных расчетов.

3. *Коэффициенты деформации* – отношение размеров тела после деформации к соответствующим размерам до деформации:

- $\gamma = h/H$ – коэффициент высотного обжатия;
- $\beta = b/B$ – коэффициент уширения;
- $\mu = l/L$ – коэффициент вытяжки (вытяжка).

4. *Смещенный объем* – объем, прибавленный или удаленный в процессе деформации в одном из главных направлений.



При деформации точка **A** описывает траекторию при перемещении в точку **A¹**.

Смещенный объем – объем в каком-либо направлении, описываемый при деформации поверхностью тела в том же направлении при неподвижности тела в целом. Впервые ввел это понятие

А.Ф. Головин для характеристики работы, затрачиваемой на пластическую деформацию.

Работа пропорциональна величине смещенного объема.

Для осадки:

H, B, L – размеры тела до деформации;

h_x, b_x, l_x – размеры тела в любой момент деформации;

h, b, l – конечные размеры тела.

Объем тела $V = H \cdot B \cdot L = h_x \cdot b_x \cdot l_x = h \cdot b \cdot l$;

dh_x, db_x, dl_x – малая деформация в любой момент времени.

Тогда объем, смещенный по высоте в любой момент времени

$$dV\Delta h = l_x b_x (-dh_x) = -\frac{V}{h_x} dh_x.$$

Интегрируя в пределах изменения размеров тела, получим

$$V\Delta h = \int_H^h \left(-\frac{V}{h_x} \right) dh_x = -V (\ln h - \ln H) = -V \ln \frac{h}{H} = -V\delta_1.$$

Аналогично

$$V\Delta b = \ln \frac{b}{B} = V\delta_2; \quad V\Delta l = \ln \frac{l}{L} = V\delta_3.$$

Многие специалисты (В.С. Смирнов, И.Я. Тарновский, М.С. Мутьев) считают, что смещенный объем является наиболее правильной характеристикой оценки формоизменения металла при ОМД.

5. *Скорость деформации* – изменение степени деформации в единицу времени. Обозначается: $\zeta, \dot{\epsilon}$, или u . Размерность – $[c^{-1}]$. Ее следует отличать от скорости деформирующего инструмента или скорости деформирования с размерностью $[m/c]$.

От скорости деформации существенно зависит сопротивление металлов пластическому деформированию σ_T . Чем больше u , тем больше σ_T . При расчетах усилия деформирования обязательно следует учитывать u .

$$\text{При осадке } u = \frac{2V}{H+h}; \text{ при прокатке } u = \frac{V\Delta h}{\sqrt{R\Delta h} \cdot H},$$

где V – скорость движения инструмента (при прокатке – скорость прокатки или окружная скорость валков); R – радиус рабочих валков.

При одной и той же скорости деформирования скорость деформации может быть различной в зависимости, например, от размеров тела.

Феноменологические законы формоизменения при ОМД

Получены на примерах свободнойковки. Закономерности используют для качественного анализа процессов ОМД. (Феномен – явление, опыт.)

Условие постоянства объема: объем тела при пластической деформации остается постоянным. Наибольшее изменение объема около 0,25%, чем можно пренебречь.

[Однако при деформации литой структуры объем может значительно уменьшаться (на 10–15%); при холодной деформации металла объем увеличивается на 0,05–0,25%; при деформации порошков – не сохраняется].

$$V_0 = V_1; HBL = hbl; \rightarrow \frac{h}{H} \frac{b}{B} \frac{l}{L} = 1; \rightarrow \gamma\beta\mu = 1.$$

Логарифмируя выражение, получим:

$$\ln(\gamma\beta\mu) = \ln 1; \rightarrow \ln \gamma + \ln \beta + \ln \mu = 0; \rightarrow \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0.$$

Из трех главных деформаций одна имеет знак, противоположный двум другим.

Умножим последнее уравнение на объем деформируемого тела

$$V\delta_1 + V\delta_2 + V\delta_3 = 0,$$

где $V\delta_1$, $V\delta_2$, $V\delta_3$ – объем, смещенный соответственно по высоте, в поперечном направлении на развитие уширения и в продольном направлении на развитие удлинения.

$$-V\delta_1 = V\delta_2 + V\delta_3,$$

то есть объем, смещенный по высоте, распределяется на развитие

продольной и поперечной деформации.

$$-(\delta_2/\delta_1) - (\delta_3/\delta_1) = 1,$$

где каждое из отношений показывает, какая доля от общего смещенного объема идет на развитие поперечной и продольной деформации.

Те или иные изделия чаще всего получают за несколько операций. Используя условие постоянства объема, можно получить выражение для определения необходимого числа операций, если известны средняя вытяжка μ_{cp} за всю обработку, исходное F_0 и конечное F_n сечение продукта. Пусть после 1, 2 и т.д. операций сечение тела будет F_1, F_2, F_3, \dots , тогда вытяжки при отдельных операциях составят

$$\mu_1 = F_0/F_1, \quad \mu_2 = F_1/F_2, \dots, \mu_n = F_{n-1}/F_n$$

или $F_0 = \mu_1 F_1, \quad F_1 = \mu_2 F_2, \dots, F_{n-1} = \mu_n F_n,$

тогда $F_0 = \mu_1 \mu_2 \dots \mu_n F_n$ или $F_0/F_n = \mu_1 \mu_2 \dots \mu_n$

и $\mu_{\Sigma} = \mu_1 \mu_2 \dots \mu_n,$

то есть суммарная вытяжка равна произведению частных вытяжек.

Если принять $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n = \mu_{cp}$, то $\mu_{\Sigma} = \mu_{cp}^n,$

где n – число операций.

$$n = \lg \mu_{\Sigma} / \lg \mu_{cp} = (\lg F_0 - \lg F_n) / \lg \mu_{cp}.$$

В ряде случаев ОМД задается лишь высотная деформация (прокатка, свободнаяковка).

Тогда удобно записывать

$$H/h = l/L \times b/B,$$

откуда следует, что при определенной величине высотной деформации могут иметь место разные соотношения изменения размеров тела в продольном и поперечном направлениях. Найти точно вытяжку μ можно только при известной величине поперечной деформации β . Если $\beta = 1$ ($\delta_2 = 0$), что имеет место при тонколистовой прокатке, то $H/h = l/L = \mu$.

Все возможные соотношения изменения размеров тела в продольном и поперечном направлениях при заданной величине высотной деформации (сочетания β и μ при $H/h = c$) можно графически представить гиперболой (по И.М. Павлову):

– вершина гиперболы лежит на прямой $\beta = \mu$ (точка 1):

$$\beta = \mu \Rightarrow c = \sqrt{H/h},$$

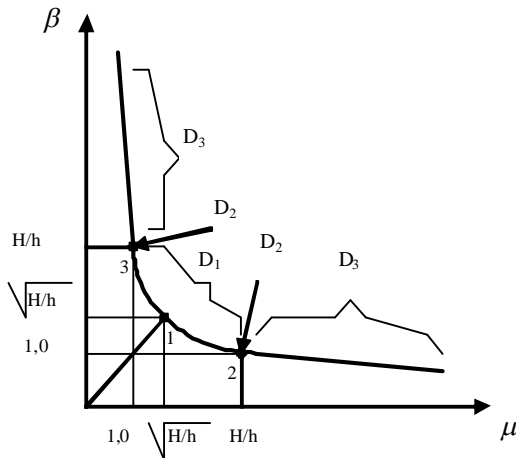
то есть поперечная и продольная деформации одинаковы;

– случай отсутствия поперечной деформации

$$\beta = 1, \mu = c = H/h \text{ (точка 2);}$$

– случай отсутствия продольной деформации

$$\mu = 1, \beta = c = H/h \text{ (точка 3).}$$



Гипербола деформации (по И.М. Павлову) в координатах $\mu - \beta$

Между точками 2 и 3 смещенный по высоте объем деформированного тела увеличивает как его продольные, так и поперечные размеры.

Чем дальше от точек 2 и 3 по верхней или нижней ветвям энергии, тем интенсивнее увеличиваются размеры тела только в одном из направлений (поперечном или продольном) за счет смещаемого объема не только по высоте, но и по продольному или поперечному направлению.

По И.М. Павлову:

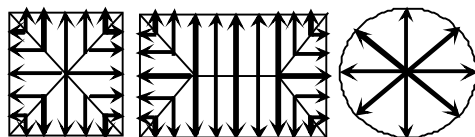
- интервал (т.2 – т.3) – первая деформационная схема D_1 ,
- (т.2 – т.3) – D_2 ,
- интервалы от точки 2 правее и точки 3 выше – D_3 .

Случаи D_1 , D_2 , D_3 охватывают всю протяженность гиперболы, то есть все случаи ОМД при заданной высотной деформации.

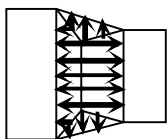
Если варьировать все три коэффициента деформации, то из условия $\gamma\beta\mu = 1$ следует пространственная диаграмма, которая имеет смысл только в первом квадранте. Это будет **ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЙ ПАРАБОЛОИД ДЕФОРМАЦИИ**, охватывающий все возможные случаи ОМД.

Условие постоянства объема упрощает все инженерные расчеты, связанные с изменением формы и размеров тела, и дает возможность установить простые зависимости между величинами, характеризующими деформацию.

Условие наименьшего сопротивления (XIX век – Г. Треска): в случае возможности перемещения точек деформируемого тела



Направления преимущественного течения металла при осадке



при прокатке

в различных направлениях каждая точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления. Сопротивление на пути перемещения может быть внутреннего или внешнего трения. При этом наименьшие затраты энергии будут на пути кратчайшей нормали к ближайшей свободной поверхности.

Величина уширения в процессах ОМД зависит от состояния сил, препятствующих течению металла в продольном и поперечном направлениях, то есть величин поперечного σ_2 и продольного σ_3 напряжений в очаге деформации.

На основании условия наименьшего сопротивления С. Зоббе в 1908 г. вывел **правило наименьшего периметра**: любая форма поперечного сечения тела при осадке при наличии контактного трения стремится принять форму, имеющую при данной площади наименьший периметр (форму круга).

С.И. Губкин предложил **условие геометрического подобия**: если трение на контакте отсутствует, то сечение, параллельное контакту, при осадке будет увеличивать свою площадь, но оставаться подобным первоначальному.

*Формулы определения соотношения
показателей деформации при осадке*

А.Ф. Головин:

$$\mu = \sqrt{1 + \frac{B}{L}(\gamma - 1)}; \quad \beta = \frac{\gamma}{\sqrt{1 + (B/L)(\gamma - 1)}};$$

$$\frac{\mu}{\beta} = \frac{1 + (B/L)(\gamma - 1)}{\gamma} \quad \frac{1}{\gamma} + \frac{B}{L} - \frac{B}{L\gamma} = \frac{L}{\gamma} + \frac{B(\gamma - 1)}{L\gamma};$$

$$\frac{\ln \beta}{\ln \gamma} = \frac{2L - B}{2L} \quad 1 - \frac{B}{2L} = \frac{2L/B - 1}{2L/B}; \quad \frac{\ln \mu}{\ln \gamma} = \frac{B}{2L}.$$

А.П. Чекмарев

$$\frac{\ln \beta}{\ln \gamma} = \frac{1}{1 + B/L} = \frac{L/B}{L/B + 1}; \quad \frac{\ln \mu}{\ln \gamma} = \frac{B/L}{1 + B/L} = \frac{1}{L/B + 1}.$$

И.Я. Гарновский

$$\frac{\ln \beta}{\ln \gamma} = \frac{1}{1 + B/L^{4f}}; \quad \frac{\ln \mu}{\ln \gamma} = \frac{B/L^{4f}}{1 + B/L^{4f}}.$$

Эти феноменологические законы (условия) по существу являются фактами, так как не вскрывают причинно-следственную связь. Их значение ограничено. Например, при растяжении цилиндра точки поверхности движутся к оси цилиндра, хотя движение в пустоту вызывает меньшее сопротивление. Эти условия не подходят для процессов гниба.

Однако данные условия важны для анализа закономерностей процесса: какими должны быть поверхность инструмента и его движение для создания заданной поверхности тела. В конечном счете одну и ту же форму тела можно получить инструментами с разной формой и разными видами их движения: плоскую поверхность (лист) можно получить инструментом круглой формы (валок прокатного стана, вращающийся вокруг своей оси), а круглую поверхность (цилиндр, валок) можно получить плоским инструментом (ковка, возвратно-поступательное прямолинейное движение).

Задача определения формы инструмента и его кинематики имеет множество решений, однако, математический язык для описания конструкций практически не разработан.

Формообразование при ОМД

Тело – часть пространства, ограниченная замкнутой поверхностью и заполненная веществом.

Твердое тело может быть получено:

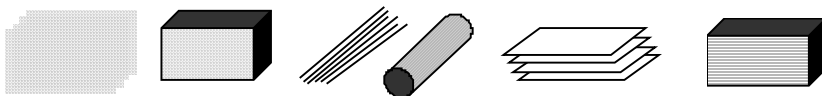
- из жидкого при остывании, охлаждении;
- из твердого отделением части целого;
- из двух или нескольких твердых тел объединением в одно целое.

Способы получения твердого тела: литье, резание, сварка плавлением, сварка давлением...

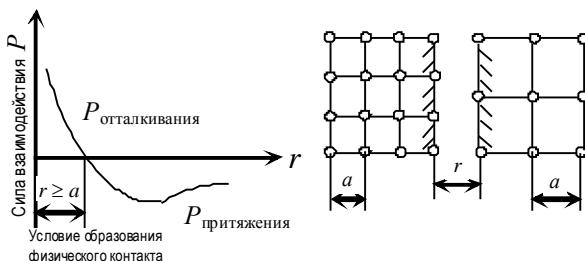
Сварка давлением – группа способов ОМД, которые объединяют в одно целое два или несколько твердых тел, находящихся в состоянии пластичности.

Цель сварки давлением – формообразование.

Сваривают порошки, волокна (нити), листы (пластины).



Методы сварки давлением: прокатка, прессование, ковка, волочение, вибрация, взрыв...



Чтобы произошла сварка давлением, необходимо твердые тела свести на расстояние, соизмеримое с межатомным, и сообщить им *энергию активации* (наименьшая энергия, которую необходимо сообщить каждой частице вещества, чтобы стал возможен данный процесс).

При сварке давлением в местах соприкосновения твердых тел начинаются пластическая деформация, взаимодействие между атомами, диффузионные процессы.

Энергия активации может быть сообщена телам приложением усилия, нагревом.

Формообразование при ОМД или сварка давлением есть частный случай формоизменения, когда в процессе совместной

пластической деформации двух или нескольких металлических тел в результате приложения нормальных сил (+ иногда тангенциальных) образуется одно твердое тело.

Сварка давлением массивных изделий может быть классифицирована по условиям ее осуществления.

Классификация видов сварки давлением по условиям осуществления
(А.С. Гельман)

Наименование процесса	Внешнее усилие (давление)	Температура	Время	Среда	Трение (скорость взаимного перемещения)
Холодная сварка	+				
Сварка с нагревом (прессовая, стыковая), сварка взрывом	+	+			
Газопрессовая сварка (с нагревом ТВЧ в контролируемой среде)	+	+		+	
Диффузионно-вакуумная сварка	+	+	+	+	
Сварка трением, ультразвуковая сварка	+	+			+

Сварка давлением используется для получения композиционных (слоистых) материалов. Их преимущества: сочетание в одном материале различных служебных свойств; снижение расхода дефицитных металлов.

Композиционные материалы можно получать и *сваркой плавлением*. Ее недостаток – образование в области соединения зон структурной и химической неоднородности, что ведет к развитию различных дефектов, появлению хрупких фаз, интерметаллических соединений – снижаются прочностные свойства соединения.

При *сварке давлением*, подбирая режимы обработки, можно управлять процессом формирования соединения, придавая ему требуемые свойства (прочность, коррозионную стойкость и др.). В настоящее время с помощью процессов сварки давлением можно соединять любые металлы и сплавы.

Классификация слоистых металлов и области их применения

Коррозионно-стойкие композиции (для изготовления основного инструмента используют низколегированные марки стали повышенной стойкости, а в качестве плакирующего слоя – сталь марки 12Х18Н10Т). Слоистая композиция имеет более высокую, чем плакирующий слой, прочность и более высокую, чем монолит-

ная коррозионно-стойкая композиция, теплопроводность. Используют для производства деталей и оборудования для предприятий химического, нефтяного, сельскохозяйственного, транспортного, энергетического машиностроения; а также в судостроении, приборостроении, радиоэлектронике.

Износостойкие композиции – в качестве плакирующего слоя используют стали и сплавы с высокой стойкостью против абразивного износа, а для основного слоя – низкоуглеродистую сталь. Применяют в сельскохозяйственном машиностроении, инструментальной промышленности (ножи, фрезы, лезвия).

Электротехнические композиции – используют в качестве проводников и деталей контактных устройств. Они сочетают в себе высокие электрические и прочностные свойства при минимальном расходе дорогостоящих и дефицитных проводниковых материалов (*Cu*, *Ag*, *Au* и др.). Кроме того, биметаллические проводники имеют, как правило, меньшую массу и более высокую коррозионную стойкость (*Cu + Cm*). Применяют в контактных устройствах радиоэлектронной аппаратуры.

Антифрикционные композиции (лат. *frictio* – трение; материалы для деталей, работающих в условиях трения) – используют при производстве подшипников (втулки, упорные кольца, сферические опоры и др.). Расход цветных металлов в биметаллическом подшипнике намного меньше, чем в монолитном (толщина антифрикционного слоя составляет доли миллиметра). Широкое применение находят также металлофторопластовые подшипники, которые способны работать в широком диапазоне температур и давлений без смазки.

Термобиметаллы – используют для изготовления чувствительных элементов тепловых приборов, автоматических регуляторов температуры и времени, компенсаторов, ваттметров, сигнализационных устройств. Основная характеристика термобиметалла – термочувствительность – способность изменять свою форму при нагреве. Для достижения максимального изгиба необходимо подбирать составляющие с большой разностью коэффициентов линейного расширения. При этом физико-механические свойства составляющих должны обеспечивать получение прочного соединения по всей контактной поверхности, а также возможность дальнейшей обработки термобиметалла (штамповка, резка, сварка). Кроме того, необходимо, чтобы термобиметалл не получал остаточных напряжений и деформаций, не изменял электросопротивление и термоактивность. Например, сплавы *75ГНД+36Н*; *24НХ+50Н*.

Слоистые металлы для бытовых изделий – используют для производства бытовых предметов, деталей внутренней отделки автомобилей, монет, значков, украшений, скобяных изделий и др.

Физическая природа соединения разнородных металлов в твердой фазе

Явление соединения металлов в твердом состоянии впервые заинтересовало исследователей при изучении взаимодействия тел в процессе трения.

В основе соединения однородных и разнородных металлов с помощью сварки давлением лежит явление *схватывания*, заключающееся в образовании *металлической связи* между атомами контактирующих поверхностей. При этом соединяемые поверхности должны быть *ювенильными* (свободными от загрязнений, оксидных пленок и адсорбированных слоев) и находиться в состоянии физического контакта (сближены до расстояния, на котором возможно электронное взаимодействие). Атомы, лежащие на поверхности кристалла, окружены меньшим числом соседних атомов, чем атомы внутри кристалла, поэтому обладают некоторым избытком свободной энергии и склонны к образованию дополнительных связей с иными атомами и молекулами, оказавшимися вблизи ювенильной поверхности.

В идеале при сближении ювенильных поверхностей на расстояние взаимодействия межатомных сил осуществляется процесс электронного взаимодействия между атомами соединяемых кристаллов, образуются энергетически устойчивые конфигурации электронов, соответствующие минимальной потенциальной энергии системы, как и у атомов, находящихся внутри кристаллов. В результате создается металлическая связь между атомами обеих поверхностей, которая характеризуется коллективизацией электронов внешних орбит.

В реальных условиях контактные поверхности соединяемых металлов всегда имеют микронеровности, покрыты оксидными и адсорбированными пленками (адсорбция – поглощение веществ из растворов на поверхности твердого тела или жидкости). Толщина оксидных пленок на механически обработанных поверхностях металла составляет до 3×10^{-5} мм. При сближении таких поверхностей физической контакт, очевидно, вначале возникает только на отдельных участках в результате пластической деформации соприкасающихся микровыступов. При этом оксидные пленки *в зоне микровыступов* разрушаются, обнажая ювенильные поверхности, на которых создаются условия для образования металлических связей. Таким образом, *первоначальное схватывание происходит только на некоторых локальных участках*. В дальнейшем число таких участков увеличивается до образования сплошных зон соединения.

При соединении разнородных металлов, обладающих различным сопротивлением деформации, площадки схватывания обра-

зуются в основном в результате пластического течения более мягкого металла.

В реальных металлах следует учитывать также особенности строения оксидной пленки, образовавшейся на контактной поверхности в результате взаимодействия металла с кислородом воздуха. Процесс окисления металла протекает в две стадии:

- адсорбция O_2 на поверхности металла;
- образование оксидов определенного состава.

Для образования ювенильной поверхности необходимо удалить не только слой оксидов, но и кислород из хемосорбированного слоя (это слой, в котором между атомами кислорода и поверхностными атомами металла действуют сильные ионно-ковалентные связи), то есть создать условия для его десорбции с поверхности металла. Для активирования контактной поверхности атомам металла, связанным с атомами кислорода, необходимо сообщить дополнительную энергию, достаточную для разрыва их связей с атомами кислорода.

Источником этой энергии могут быть дефекты кристаллической решетки, выходящие на контактные поверхности, а также термические флуктуации (тепловое движение частиц). К активированию контактных поверхностей приводят нагрев, пластическая деформация, предварительная химическая обработка (зачистка, травление...), обработка вакуумом.

Сварка в режиме сверхпластичности позволяет использовать особо активированное состояние поликристаллов, что существенно интенсифицирует процесс сварки. Например, сварка титановых сплавов в режиме сверхпластичности по сравнению с обычной сваркой позволяет в 4 раза снизить необходимое усилие, в 6–30 раз – длительность сварки и на 50–150°C – температуру.

Факторы, определяющие прочность соединения слоев металлической композиции

На прочность соединения слоев композиционного материала влияют следующие факторы:

- свойства самих металлов:
 - состояние контактных поверхностей;
 - прочностные свойства;
 - пластические свойства;
 - химический состав;
- параметры процесса:
 - усилие деформирования;
 - температура;
 - скорость деформации;
 - состав газовой среды.

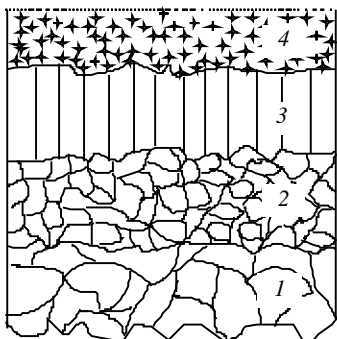
1. Свойства свариваемых металлов

1.1. Состояние контактных поверхностей

Прочность соединения слоев биметалла оценивают по сопротивлению срезу и отрыву.

Чем больше шероховатость свариваемых поверхностей, тем прочнее изделие. Но: при получении слоистых композиций с тонким твердым плакирующим слоем шероховатость контактных поверхностей может стать причиной разнотолщинности, а при пониженных пластических свойствах металла может привести к возникновению периодических разрывов.

Большое влияние на схватывание металлов оказывают оксидные пленки, всегда присутствующие на контактных поверхностях. Они образуются в результате процесса *физической адсорбции* (захватывания поверхностными атомами металла молекул окружающего газа и, в первую очередь, кислорода) и последующей *химической адсорбции* (взаимодействия атомов газа и металла с образованием прочных связей).



- 1 – металл глубоких слоев;
- 2 – внешний кристаллический слой с частицами оксидов;
- 3 – оксидный слой;
- 4 – адсорбированный слой (вода, воздух, масло, пыль)

Образование оксидных пленок происходит с большой скоростью уже при комнатной температуре – толщина пленки для железа достигает $5\text{--}10\text{ нм} = (5\text{--}10)\times 10^{-6}\text{ мм}$ (1 нанометр = 10^{-9} м). Образование толстых пленок (окалины) происходит при высоких температурах. Если металл образует несколько оксидов, то формируется многослойная окалина, например, для железа $\text{FeO} - \text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Большой связью с металлом обладают *тонкие* пленки, которые плохо отслаиваются и затрудняют образование ювенильных поверхностей.

Чем больше отношение твердости оксида к твердости металла, тем легче происходит разрушение

пленки в процессе пластической деформации, улучшающее условия схватывания.

Повысить твердость поверхностного слоя можно за счет упрочнения контактной поверхности соединяемых металлов с помощью механической обработки, например, зачистки щетками (твердость железа увеличивается в 4,6 раза), обточкой, травлением.

Любой вид механической обработки приводит к искажению кристаллической решетки поверхностного слоя, увеличению числа вакансий и плотности дислокаций в нем:

*ОМД → наклеп → текстура деформации →
→ неравномерность деформации → неоднородность свойств →
→ возникновение остаточных напряжений.*

Все это оказывает влияние на процесс схватывания металла.

1.2. Химический состав

Примеси и легирующие элементы, содержащиеся в соединяемых металлах и сплавах, *затрудняют их схватывание*. С повышением их содержания увеличивается степень деформации, необходимой для прочного соединения.

1.3. Механические свойства

С повышением пластичности металлов и снижением сопротивления деформации их склонность к образованию прочного соединения *повышается*. При получении слоистой композиции в условиях повышенных температур необходимо учитывать изменение пластических характеристик соединяемых металлов в результате нагрева.

2. Параметры процесса

2.1. Степень деформации

Прочность соединения металлической *композиции повышается с ростом степени обжатия* (интенсификация деформации контактных поверхностей, разрушение оксидных пленок, уменьшение неравномерности деформации слоев).

2.2. Температура

Влияние температуры носит сложный характер. Оно определяется результирующим действием многих зависящих от нее явлений. Пластичность большинства металлов понижается в зоне хрупкости из-за выпадения из твердого раствора дисперсных выделений. С повышением температуры интенсифицируются процессы окисления контактных поверхностей. Возникающие оксидные пленки затрудняют образование соединения. Нагрев способствует протеканию диффузионных процессов, улучшая условия схватывания.

2.3. Газовая среда

В большинстве случаев слоистые металлы получают без защитной атмосферы. При этом контактные поверхности тщательно очищают непосредственно перед сваркой, чтобы свести к минимуму время их нахождения на воздухе.

В ряде случаев (горячая прокатка, прессование), когда металлы обладают высокой газопоглощающей способностью (тугоплавкие и редкие металлы и сплавы: литий, цезий, индий, таллий, ва-

надий, ниобий, тантал, молибден, вольфрам, радий, уран и др.), для предохранения контактных поверхностей металла от взаимодействия с активными газами воздуха при высокотемпературной обработке применяют следующие методы:

- нагрев и последующую пластическую деформацию в инертной или восстановительной среде;
- заключение исходных заготовок в металлические оболочки;
- нагрев и деформацию в вакууме.

Особенности образования соединения и пластической деформации металлов при совместной прокатке

Основной промышленный способ получения слоистых металлов – прокатка в горячем или в холодном состоянии. На рисунке показаны три стадии формирования биметалла *Ст3+Х18Н10Т* в процессе **горячей прокатки** (заштрихованы контактирующие с валками зоны, в которых вследствие более интенсивного охлаждения размер и форма зерен отличаются от формы и размеров зерен основного металла):

1-я стадия – развитие механической связи между слоями, обжатие неровностей поверхностей слоев, частичное разрушение оксидных пленок, контактирование локальных участков ювенильных поверхностей, сопровождающееся появлением *узлов схватывания*;

2-я стадия – превращение узлов схватывания в *мостики сцепления*: уменьшается свободная энергия контактирующих поверхностей, появляются вблизи границы раздела зоны с повышенной концентрацией вакансий, дислокаций и других дефектов строения кристаллической решетки;

3-я стадия – превращение мостиков сцепления в *межслойную границу* в результате диффузионных процессов, вызванных воздействием температуры и усиленных появлением дефектов строения вблизи границы раздела слоев металла. При этом происходит измельчение и «рассасывание» частиц оксидных пленок (в результате рекристаллизации, перестраивающей поверхности контактирующих зерен).

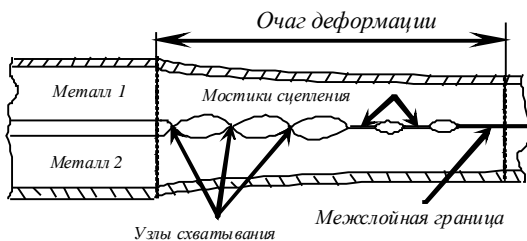


Схема образования биметалла при горячей прокатке (заштрихованы контактирующие с валками зоны)

Авторы предложенной схемы М.Г. Лозинский и А.И. Тананов отмечают, что все стадии образования соединения протекают за один проход при максимально возможном обжатии. При этом отдельные этапы развиваются непрерывно по мере продвижения данного участка соединения через очаг деформации.

С.А. Голованенко предложил дополнить описанную выше схему формирования биметалла еще двумя стадиями:

4-я стадия – охлаждение – продолжают изменения структуры и свойств соединения. Прочность соединения может повыситься или снизиться. Охлаждение металла сопровождается *возникновением внутренних остаточных напряжений*, которые могут привести к изгибу биметаллической полосы и даже появлению микротрещин;

5-я стадия – последующая *термическая обработка* – происходит перекристаллизация (в сплавах, претерпевающих фазовые превращения) или *рекристаллизация и релаксация напряжений*. В биметалле при термической обработке интенсивно протекают диффузионные процессы.

При совместной холодной прокатке приконтактные слои, предварительно обработанные металлическими щетками и не имеющие запаса пластичности, симметрично разрушаются. Образующиеся трещины заполняются металлом с ювенильными поверхностями, которые, вступая в контакт, *схватываются* – дискретно, в областях интенсивного пластического течения металлов, где максимальна плотность вышедших на поверхность дислокаций. Дальнейшее повышение степени деформации ведет к увеличению числа и величины мостиков сцепления, которые объединяются и охватывают всю площадь контакта металлов. При холодной прокатке качество сцепления определяется *степенью пластической деформации приконтактных слоев*, которая необходима для разрушения оксидных пленок, получения ювенильных поверхностей с активными центрами и их сближения.

Межслойная неравномерность деформации

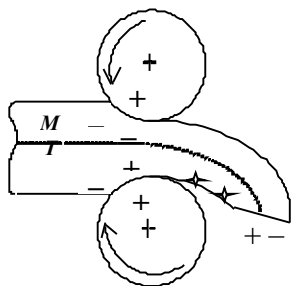
Особенностью деформации слоистых композиций является *неравномерность распределения* ее между слоями вследствие различия свойств составляющих. В большей степени деформируется металл, обладающий меньшим сопротивлением деформации. Кроме того, *деформация слоистых металлов происходит в условиях межслойного трения до тех пор, пока не произошло прочного соединения слоев композиции*.

Величина неравномерности деформации при прокатке биметалла зависит от:

- соотношения сопротивлений деформации составляющих;
- соотношения исходных толщин слоев;
- порядка укладки слоев: $M-T-M$, $T-M-T$ (M – мягкий слой, T – твердый слой);
- параметров очага деформации;
- контактных и межслойных сил трения (их величины и направления);
- натяжения.

М.И. Бояршинов и Г.Э. Аркулис установили, что сопротивление деформации биметалла близко к среднему значению сопротивления деформации составляющих.

Основные закономерности изменения контактных напряжений в зависимости от формы очага деформации и натяжения, присущие прокатке монометаллов, справедливы и для совместной прокатки разнородных металлов. С помощью изменения переднего и заднего натяжения можно управлять распределением деформации, необходимой для обеспечения заданного соотношения толщин слоев и прочности их соединения.



Характер взаимодействия слоев заготовки между собой и деформирующим инструментом (валками) в асимметричном биметаллическом пакете показан на рисунке.

Как известно, при деформации заготовки, составленной из металлов с разными механическими свойствами, в мягких слоях появляются дополнительные напряжения сжатия, а в твердых – дополнительные напряжения растяжения. В приконтактных поверхностях слоев металлов, в результате взаимодействия с ними валков, возникают сжимающие напряжения. Таким образом, мягкий слой заготовки подвергается действию *дополнительных сжимающих напряжений* как со стороны валка, так и со стороны твердого тела. В результате этого деформация мягкого слоя затрудняется, а твердого – облегчается, что приводит к сближению деформаций обоих слоев, а следовательно, к снижению неравномерности деформации биметалла. Уменьшение толщины мягкой составляющей по отношению к твердой способствует выравниванию послойных деформаций.

Прочная связь между слоями, препятствующая взаимному смещению частиц металла на границе раздела слоев, оказывает существенное влияние на характер деформированного состояния. При этом деформации слоев более равномерны, чем при отсутствии межслойной связи. Различие деформации M и T слоев приводит к

изгибу биметалла. Если создать условия, препятствующие изгибу (проводки), то неравномерность проявится в виде наплывов мягкого слоя на краевых частях полосы, которые удаляют в отходы.

Пример. При прокатке биметалла $Cu+Al$ при соотношениях $H_M/H_T=0,3$ и $l/H_{cp}=4$ – послойные деформации почти равны (l – длина очага деформации).

Если же толщины M и T составляющих должны быть равны, возникает значительная неравномерность деформации.

Для снижения неравномерности деформации осуществляют прокатку в симметричных четырехслойных двойных пакетах по схеме $M+T+M$ и $T+M+T$.

Схема $M+T+M = M+T+T+M$. Между твердыми слоями помещают разделительный подслой, препятствующий их соединению при прокатке. В мягких слоях в приконтактных поверхностях с валком и твердым слоем возникают дополнительные сжимающие напряжения, в твердых – растягивающие. Такая схема обеспечивает минимальную неравномерность послойных деформаций.

Схема $T+M+T$. Соответственно, в *твердом слое* на границе с валком – сжимающие напряжения, на границе с мягким слоем – растягивающие. Твердые слои будут деформироваться в меньшей степени, чем при схеме $M+T+M$, а неравномерность деформации при прочих равных условиях будет выше (ε – степень деформации).

$$\varepsilon_M > \varepsilon > \varepsilon_T; \quad \varepsilon_T/\varepsilon < 1; \quad \varepsilon_M/\varepsilon \geq 1; \quad \varepsilon_T/\varepsilon_M \leq 1.$$

Если известно одно из соотношений, можно определить деформацию каждого слоя.

В общей форме зависимость относительной деформации от основных параметров процесса имеет вид функции:

$$\varepsilon_T/\varepsilon = \psi(\sigma_T/\sigma_M; H_T/H; l/H_{cp}; f; \rho; \varphi),$$

где f – коэффициент внешнего трения; ρ – параметр, характеризующий трение между слоями; l/H_{cp} – параметр очага деформации; H_T и H – соответственно начальная толщина соответственно твердой составляющей и биметалла; σ_T и σ_M – сопротивление деформации соответственно твердых и мягких слоев.

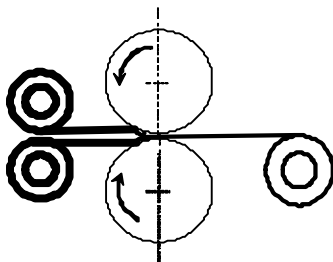
Таким образом, при разработке технологии процесса получения слоистых металлов с предварительным сцеплением слоев необходимо учитывать послойные деформации, их зависимость от параметров процессов ОМД и, в частности, прокатки.

Формообразование при холодной сварке давлением

Энергия активации кристаллической решетки достигается только за счет пластической деформации (внешнее усилие). Плотность дислокаций возрастает до 10^{11} 1/см², хотя на их создание идет большая доля работы.

Материал	Степень деформации	Работа сварки	
		кал/г	Процент от всей работы
Медь-сталь	0,26	0,07	5,0
Алюминий-сталь	1,0	0,84	10,0
Сталь-сталь	0,6	0,66	8,0

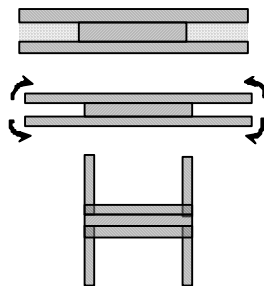
Замечание. Схватывание – недопустимый процесс при работе механизмов, но полезен при ОМД, если это не схватывание металла с инструментом



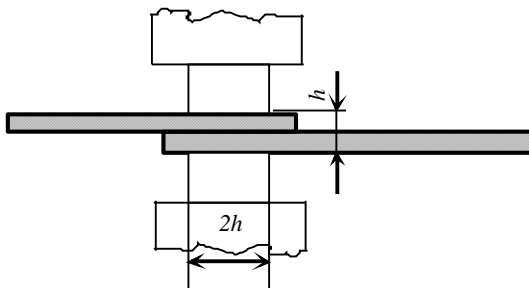
Способ сварки прокаткой

И.М. Павлов с сотрудниками предложили изготавливать **двухфазный профиль** (в том числе и биметаллический) с использованием прокатки на гладких валках по схеме:

- прокатка (сварка в холодном состоянии);
- удаление наполнителя;
- разгибание полок.



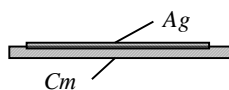
При холодной сварке внахлестку диаметр пуансона должен быть в два раза больше толщины свариваемых металлических заготовок, так как обеспечивает наибольшее растекание металла в месте сварки (зона прилипания на контакте «инструмент – металл» равна $2h$). При этом на контакте металла с инструментом течение металла отсутствует, и поперечная деформация идет на контакте свариваемых заготовок.



При холодной сварке на воздухе степень деформации должна быть **более 50%**.

$\varepsilon_{\text{миним}} = \text{глубина вдавливания} / \text{толщина материала}$.

Для алюминия $\varepsilon_{\text{миним}}=67\%$; для стали – 84%; для меди – 90%.



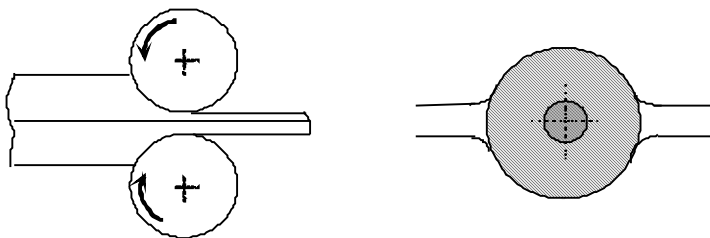
Особый интерес представляет совместная холодная прокатка тонких листов из неоднородных материалов. В электронной промышленности применяют сталь, плакированную серебром или алюминием. В данном случае может быть использована только холодная сварка, так как при горячей сварке происходит диффузия и ухудшаются электрические характеристики.

Холодная сварка давлением применяется для соединения однородных и разнородных пластичных металлов в электротехнической промышленности и при изготовлении бытовых товаров из алюминия и его сплавов.

Горячая сварка давлением

Энергию активации при горячей сварке давлением обеспечивают за счет температуры, которая должна быть *не меньше температуры рекристаллизации*.

Горячая прокатка разнородных материалов

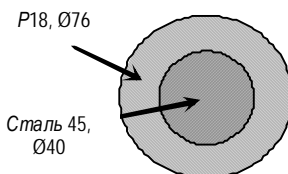
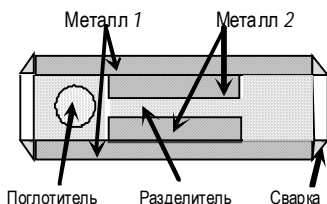


При горячей сварке давлением следует учитывать *остаточные напряжения*, возникающие в изделиях (например, при остывании биметалла *Ст3+08Х17Т* дополнительные остаточные напряжения, возникающие на разделе поверхностей двух металлов, достигают 130 Н/мм^2 – возможна пластическая деформация за счет возникших напряжений).

Для соединения стали с медью необходимо обжатие 20%, для других металлов – значительно меньше, чем при холодной прокатке.

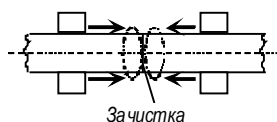
Существенным фактором при сварке давлением в горячем состоянии является *образование воздушных полостей* в пакете. При

сварке газ должен либо прореагировать с металлом, либо в нем раствориться. Азот – нежелательный газ, поэтому внутрь пакетов помещают газопоглотители. Из одной четырехслойной заготовки получают два биметаллических листа.

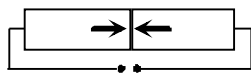


При **горячем прессовании** получают в виде прутков биметаллические заготовки для сверл, фрез и другого инструмента (P18 – быстрорежущая сталь, содержащая 0,7–0,8% углерода и 18% вольфрама).

Горячая прессовая сварка

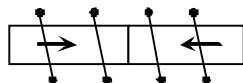


Прессовая сварка с общим нагревом заготовки.



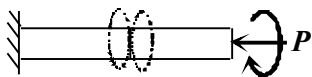
Контактная стыковая сварка.
 $t = 1000^{\circ}\text{C}$; $\tau = 2-5 \text{ с}$; $\rho_{\text{тока}} = 30-40 \text{ а/мм}^2$;
 $\sigma = 100-130 \text{ Н/мм}^2$.

Деформация сближения ~ 20 мм.



Нагрев заготовки *токами высокой частоты* или *индукционной сваркой*.

Сварка с использованием трения – прижатие поверхностей свариваемых деталей друг к другу и одновременное развитие трения скольжения. Нагрев происходит за счет тепла, генерируемого работой трения.



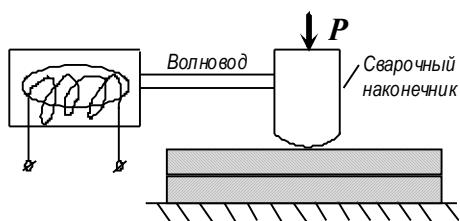
Для заготовки диаметром 20 мм из низкоуглеродистой стали при скорости 2800 об/мин в начальный момент при разогреве давление составляет $p = 40-50 \text{ Н/мм}^2$, а затем его увеличивают до $p = 100-150 \text{ Н/мм}^2$ (стадия проковки). Трение дает не только температуру, но и *разрушает окисные пленки*, которые мешают процессу схватывания (формообразования).

Высокое стабильное качество сварки не требует очистки поверхности.

Горячей сваркой давлением получают коррозионно-стойкие биметаллические изделия, термобиметаллические листы: $Ct+Al$, $Ct+Cu$, $Cu+Al$, $Al+Ti$.

Ультразвуковая сварка (сварка трением)

Соединение составляющих композиции происходит в результате воздействия сдвиговых колебаний и небольших сдавливающих усилий.



Давление $p=40-120 \text{ Н/мм}^2$. Амплитуда колебания составляет 20–30 мкм; частота колебания – 18–30 кГц. Температура повышается до нескольких сотен градусов (медь – до 450°C; молибден – до 1500°C).

Ультразвуковую сварку применяют для соединения пластин и деталей малой толщины из металлов, склонных к образованию хрупких интерметаллических включений.

(Интерметаллид – химическое соединение металла с металлом, которое чаще всего не подчиняется правилу нормальной валентности. Например, $CuAl_2$, $MgZn_2$, $Cu_{37}Sn_8$, Al_2CuMg . Интерметаллиды входят в структуру большого числа промышленных сплавов, обеспечивая их упрочнение).

Диффузионно-вакуумная сварка – длительное воздействие повышенной температуры и значительная пластическая деформация. Идет взаимная диффузия атомов в процессе ползучести (ползучесть – нарастание деформации при постоянных напряжениях), выравнивание микровыступов, что сопровождается схватыванием.

Пример. Ст3: $t = 1000^\circ\text{C}$; $p_{\text{вакуум}} = 10^{-3}-10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$;
 $\tau \sim 2 \text{ мин}$; $p = 20 \text{ Н/мм}^2$.

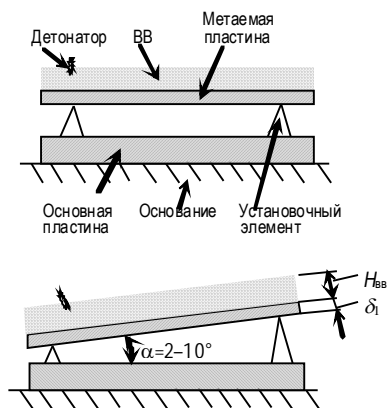
Вакуум необходим, чтобы на поверхности металлов не образовывались окисные пленки, которые мешают процессу сваривания. Пленки при атмосферном давлении образуются за $2,4 \times 10^{-9} \text{ с}$, а при $p_{\text{вакуум}} = 10^{-10} \text{ мм рт.ст.}$ – за $1,8 \times 10^4 \text{ с}$.

Диффузионно-вакуумную сварку применяют для соединения сложных точных деталей из малопластичных и тугоплавких металлов и сплавов.

Сварка взрывом

Использование энергии взрыва в металлообработке известно с конца XIX века. Первое сообщение о сварке взрывом появилось в 1944 г. Эффект сварки металлов взрывом был получен в процессе исследования механизма действия кумулятивных зарядов советскими учеными под руководством академика М.А. Лаврентьева. Примерно в это же время в США во время испытания взрывчатых

веществ наблюдали соединение двух тонких латунных дисков, используемых для установок заряда. Однако как технологический процесс получения многослойных металлов сварка взрывом получила развитие в СССР с 1961 г., когда в институте гидродинамики АН СССР В.С. Седых, А.А. Дерibas и Е.И. Тришин получили этим методом и исследовали соединение пластин из низкоуглеродистой и высокомарганцевистой марок стали.



Различают две схемы сварки взрывом: параллельную и угловую. На опоре (грунте, бетоне, металлической плите) располагают неподвижную (основную) пластину, над которой на некотором расстоянии параллельно или под небольшим углом α располагают метаемую пластину (плакирующий слой). На метаемую пластину непосредственно или через защитную прослойку укладывают заряд взрывчатого вещества (ВВ) и устанавливают детонатор. При ини-

цировании ВВ по заряду распространяется детонационная волна со скоростью D , и под действием высокого давления расширяющихся продуктов взрыва отдельные участки метаемой пластины последовательно приобретают скорость V_0 порядка нескольких сотен метров в секунду, поворачиваются относительно своего первоначального положения и через некоторое время (10^{-3} – 10^{-6} с) соударяются с неподвижной пластиной. *Детонация – процесс химического превращения ВВ, сопровождающийся выделением теплоты и газообразных продуктов и распространяющийся с постоянной скоростью, превышающей скорость звука в данном веществе.* В месте соударения развивается давление, во много раз превышающее динамическую прочность металлов свариваемых пластин. В результате косоого соударения пластин при правильно выбранных параметрах процесса в зоне контакта происходят частичная очистка соединяемых поверхностей, их активация и образование прочной межслойной связи.

Взрыв с физической точки зрения – очень быстрое выделение энергии, связанное с внезапным изменением состояния вещества. Переход энергии при взрыве из потенциальной в кинетическую сопровождается образованием ударной волны и совершением механической работы.

Перемещающаяся область сжатия, отделенная резкой границей от остальной среды, до которой еще не дошло действие взрыва, на-

зывается *ударной волной*, ее прохождение характеризуется скачкообразным изменением показателей среды: давления, плотности, температуры. За фронтом ударной волны эти показатели изменяются почти мгновенно, а перед фронтом – остаются на исходном уровне.

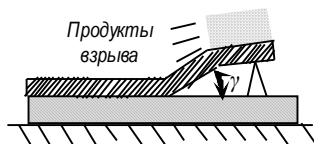
Для оценки максимальной скорости полета метаемой пластины используют зависимости, полученные для случая одномерного метания пластины

$$V = 1,2D \frac{\sqrt{1+(32/37) \cdot r - 1}}{\sqrt{1+(32/37) \cdot r + 1}}; \quad r = \frac{\rho_0 H_{\text{ВВ}}}{\rho_{\text{Мс}} \delta_1},$$

где ρ_0 и $\rho_{\text{Мс}}$ плотность соответственно заряда и металла метаемой пластины; $H_{\text{ВВ}}$ и δ_1 – толщина соответственно слоя взрывчатого вещества и метаемой пластины; r – отношение массы взрывчатого вещества к массе метаемой пластины; V – скорость соударения ($V_0 = 400\text{--}800$ м/с); D – скорость детонации ($D = 1500\text{--}8000$ м/с).

Необходимые условия для сварки:

- скорость соударения (пластическая деформация + сварка) должна быть меньше скорости детонации;
- скорость сварки не должна превышать скорости прохождения звука в свариваемых металлах.



При использовании взрывчатого вещества (ВВ) с малой скоростью детонации свариваемые пластины располагают параллельно друг другу. Чтобы увеличить скорость соударения (приблизить ее к скорости детонации), метаемую пластину располагают под углом. Так как метаемая пластина при этом испытывает двойной перегиб, применение малопластичных марок стали затруднено.

Максимальное давление на поверхности пластин при $D=6000$ м/с: для алюминия – $P=195$ кбар ($1950 \text{ кг/мм}^2 = 19500 \text{ Н/мм}^2$); для железа – $P=200$ кбар ($1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа}$ или Н/мм^2).

Температура в точке соударения сначала растет, потом падает.

P , кбар	$T_{\text{святия}}$, °С	$T_{\text{ост}}$, °С
130	60	30
500	550	250
750	1050	400

Давление, вызываемое взрывом, во много раз превышает предел текучести обрабатываемых материалов, поэтому металлы приобретают новые свойства: $\sigma_{\text{в}}$ увеличивается примерно в пять раз; возможно образование железа с гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой ($P = 115$ кбар, $T < 500^\circ\text{C}$); температура плавления увеличивается на 100°C ; давление увеличивается на 50 кбар.

В условиях высоких скоростей соударения пластин под действием значительных давлений продуктов взрыва и развивающихся при этом температур происходит пластическое течение поверхностных слоев подобно жидкости (значительная пластическая деформация, нарушающая плоскостность свариваемых поверхностей). Энергия активации носит *механический характер*: на кон-



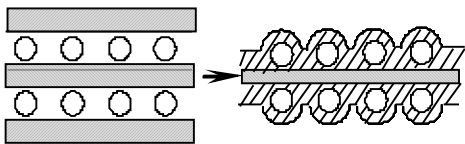
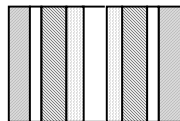
такте сварки происходит сближение до атомных уровней и механическое взаимное перемешивание

движущихся поверхностных слоев металлов под действием ударных давлений. На контактной поверхности развиваются высокие температуры, в результате чего в околошовных зонах могут происходить процессы отжига (а иногда и рекристаллизация) наиболее деформированных слоев.

Время схватывания при сварке взрывом 10^{-7} с. Процессы диффузии не успевают пройти, поэтому после сварки взрывом изделия подвергают либо термической обработке, либо горячей прокатке.

Достоинства сварки взрывом:

- дешевизна (1 кг ВВ в советские времена стоил 10–12 коп);
- малые расходные коэффициенты (1,05–1,1 вместо 2,0 при горячей прокатке);
- возможность сварки разнородных металлов (сталь – нержавейка, сталь – латунь, сталь – алюминий, сталь – титан и др.);
- возможность сварки сложных поверхностей, слоистых изделий, волокон;
- возможность сварки многослойных пакетов (до 20 слоев), получение армированных композитов (увеличение прочности в 4–5 раз).



Имеются полигоны для осуществления сварки взрывом в ОАО «НОСТА» (г. Новотроицк), в г. Нытва. Там получают листовой биметалл. Площадь свариваемых листов 5–10 м²; основной лист (сляб) стальной толщиной 10,0–150,0 мм, метаемый лист – из нержавеющей стали или титана толщиной 2,0–10,0 мм.

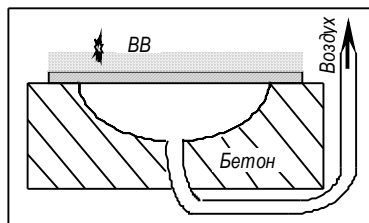
Недостатки способа сварки взрывом:

- опасность взрыва (сложность хранения);
- много шума, что требует удаления от жилья, спец. полигонов.

Взрыв применяют для одновременного сваривания патрубков с дном котлов на атомных электростанциях.

Методом сварки взрывом можно получить любые сочетания металлов и сплавов. Наиболее целесообразно и экономически оправдано применение сварки взрывом для соединения таких композиций, которые невозможно или весьма затруднительно получить другими методами: сталь-свинец, сталь-серебро, сталь-титан, сталь-медь, сталь-латунь в виде толстых крупногабаритных листов.

Помимо формообразования взрыв применяют для формоизменения и упрочнения металлов.



С целью **формоизменения** взрыв применяют для штамповки линз локаторов и днищ цистерн. При этом, что очень важно, в местах изгиба листовой заготовки отсутствует утонение, которое неизбежно возникает при классическом способе штамповки.

Преимущества процесса формоизменения с помощью целенаправленного взрыва: дешевизна матрицы; быстрота; компактное и недорогое оборудование; нет больших затрат энергии; высокое качество получаемых изделий.

Взрыв применяют для **упрочнения металлических изделий**. Необходимое условие $D > V_{\text{звука в металле}}$.

При этом изменяются структура и плотность дислокаций только в поверхностном слое (на несколько миллиметров). Дальше дислокации не успевают пройти, так как дислокации движутся со скоростью звука в металле, что меньше скорости детонации. При упрочнении металлов с помощью взрыва в очаге возникает давление 200000–1000000 атмосфер. В России упрочняют стрелки на железных дорогах. В США упрочняют и головки железнодорожных рельсов. При этом твердость изделий возрастает с 280 до 360 ед. Упрочняют также зубья экскаваторов, конусы дробилок и др. Причем одновременно происходит отбраковка изделий (зубья с трещинами разрушаются). Простой и дешевый способы упрочнения. Сварку, штамповку с помощью взрыва применяют в Новосибирске, Минске, Харькове.

С целью **формообразования** взрыв также применяют для спекания порошков в порошковой металлургии.

Сварка (спекание) порошков

Соболевский П.Г. и Мобарский В.В. получили монокристалл спеканием порошков в 1830 г. (платиновые монеты). В 1980 г. мировое производство металлических порошков достигло 1,5 млн т.

Порошковые тела обладают рядом особенностей:

- размеры порошковых частиц составляют 0,1–1000 мкм;
- в 1 см³ порошкового тела может содержаться 10³ частиц;
- площадь поверхности порошинки – 0,01–20 см²;
- температура плавления уменьшается с уменьшением размеров (фракции) частиц (температура плавления компактного свинца составляет 237°С; свинца в порошке с размерами частиц 5×10⁻⁶ см – на 7°С ниже; а с размерами 5×10⁻⁷ см – на 41°С ниже);
- поверхность фактического соприкосновения в порошковых телах составляет очень малую долю всей поверхности – 0,001–0,01%, последствием чего является тот факт, что среднее давление 10 Н/мм² приводит к контактным напряжениям между порошинками ~ 2000 Н/мм². Уже от веса насыпанного порошка может начаться пластическая деформация и первоначальный точечный контакт переходит в контакт поверхности;
- в малых порошинках возникает схема всестороннего неравномерного сжатия, обусловленная свободной энергией поверхности (наблюдается рентгеноструктурным методом по искажению кристаллической решетки).

При прессовании объем порошкового тела изменяется в результате заполнения пустот между частицами за счет их смещения и пластической деформации.

Свободная засыпка порошка характеризуется арочным эффектом (возникновение в металлическом порошке пор, превышающих размеры наиболее крупных частиц порошка).

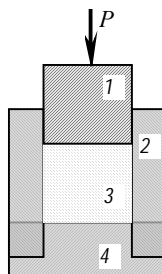
Под действием прикладываемых внешних сил пустоты заполняются – достигается наиболее плотная укладка порошинок.

В случае пластичных материалов дальнейшее уплотнение будет происходить за счет пластической деформации частиц (формоизменение отдельных порошинок), причем, сначала на контакте с инструментом, а затем и в глубине насыпанного порошка.

При прессовании хрупких материалов деформация проявляется в разрушении и дроблении выступов на поверхности порошинок.

Изменение относительной плотности порошка (*относительная плотность* – отношение фактической плотности порошка к плотности беспористого материала) при прессовании происходит в три этапа.

Наиболее интенсивное уплотнение происходит на первом этапе: идет перераспределение частиц за счет их смещения и более



Пресс-форма:

- 1 – пуансон верхний;
- 2 – матрица;
- 3 – порошок;
- 4 – пуансон нижний (подставка)



плотной упаковки, которое может тормозиться трением их о поверхности соседних частиц и о поверхность стенок пресс-формы.

На втором этапе частицы порошка, упакованные максимально плотно, оказывают сопротивление сжатию, давление прессования возрастает, а плотность порошкового тела некоторое время не увеличивается. Пластическая деформация в приконтактной зоне носит ограниченный, локальный характер.

Когда давление прессования превысит сопротивление сжатию частиц порошка, начинается третий этап процесса уплотнения: пластическая деформация охватывает весь объем каждой частицы, смещение контактов прекращается и они фиксируются (*процесс формообразования*).

Фактически в процессе прессования все три этапа идут одновременно: пластическая деформация отдельных частиц начинается уже при малых давлениях, в то время, как скопление отдельных порошинок продолжается и при высоких нагрузках. Чем пластичнее металл, тем при более низком давлении начинается уплотнение за счет деформации частиц.

Большая заслуга в разработке теоретических положений, связанных с уплотнением порошковых тел при прессовании, принадлежит М.Ю. Бальшину. Он показал, что количественная зависимость плотности прессовки от давления прессования может быть выражена уравнением

$$\lg p = -m \lg \beta + \lg p_{\text{макс}},$$

где p — приложенное давление прессования; $p_{\text{макс}}$ — давление прессования, обеспечивающее получение беспористой прессовки (компактного тела); m — показатель прессования (для металлических порошков $m \geq 3$); β — относительный объем прессовки.

При размере частиц 10^{-4} см устанавливается равновесная форма частиц вследствие *поверхностной диффузии атомов*.

Для порошковых тел должна существовать своя механика, объединяющая понятия механики сплошной среды и механики материальной точки (кристаллическая механика).

В отличие от компактных литых металлов прочность порошковых прессовок возрастает с уменьшением твердости и ростом пластичности (например, прессовки из меди прочнее, чем из железа): у пластичных материалов в результате быстрого заполнения кон-

тактных микронеровностей в непосредственный контакт вступает большее число атомов совмещенных поверхностей, что способствует проявлению молекулярных сил сцепления.

Характеристика порошков

Порошок	Фракция (размер) порошка, мкм	Плотность насыпки γ , г/см ³	Плотность утряски γ , г/см ³
Железный (ГОСТ 8848)	90–100	2,57	2,9
Молибденовый	1000–3000	1,63	1,98
Титановый	40–50	0,95	1,23
Медный	10–15	1,71	2,4

Спрессованные брикеты (прессовки) принято характеризовать прочностью на сжатие и изгиб, так как прочность на разрыв невелика.

При холодном прессовании порошка получают брикет (полупродукт), в котором осуществлено формоизменение (пластическая деформация отдельных порошинок) и лишь частично начато формообразование. Брикет остается пористым и имеет ничтожную прочность. Далее такой брикет спекают (нагревают до температуры $T = (0,5–0,7) T_{\text{плав}}$), при этом через места схватывания (сварки) происходит диффузия.

При горячем прессовании порошков процессы пластической деформации и диффузии идут одновременно. Давление и пластическая деформация увеличивают скорость диффузии.

Спекание ведут в среде водорода или восстановительных окислов. При прокатке порошков процесс интенсифицируют ультразвуком (активация атомов).

При спекании порошков с использованием процессов ОМД можно получать материалы и составы, не реализуемые методами литья (нерастворимые соединения, металлокерамика), можно получать пористые изделия для дальнейшей пропитки их жидкостью (подшипники), слоистые изделия.

Кроме прессования существуют другие способы формообразования перед спеканием: осаждение из суспензий, пластификаторный (пропитывание вязкими жидкостями). В этих способах для формообразования иногда используют обработку резанием, но спеченные изделия имеют форму, близкую к форме готового изделия.

Аморфные металлы

Обычные металлы имеют кристаллическую структуру. Но за счет определенных технологических процессов их можно «перевести» в аморфное состояние.

У аморфных металлов, как и у стекла, неупорядоченная, некристаллическая структура, в силу чего их называют «металличе-

ским стеклом». Они имеют необычные характеристики, ценные для многих технических целей. При подходящем составе они могут иметь идеальные магнитные свойства, очень высокую прочность при одновременно высокой эластичности и значительную устойчивость против коррозии.

Аморфные металлы состоят, как минимум, из двух различных металлов. Чтобы сохранить аморфность, необходимо очень быстро охладить металл, чтобы не оставалось времени для образования кристаллической структуры. Это достигается путем набрызгивания расплава на вращающийся охлажденный медный барабан. Чтобы достичь достаточно большой скорости охлаждения, нужно, чтобы создаваемые слои имели толщину не более 0,05 мм.

В целях создания более толстых слоев аморфных металлов тонкие 25-микронные пленки никеля и циркония попеременно закладывают слоями, заворачивают по спирали и сильно деформируют. При последующем многочасовом накаливании при температуре 300–350°C атомы никеля диффундируют в слои циркония. При этом атомы циркония практически неподвижны, происходит образование аморфной структуры.

Раздел 4. СВОЙСТВООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВОИЗМЕНЕНИЕ

Образование свойств при ОМД

Свойства металлических тел можно классифицировать следующим образом.

Физические	Механические	Прочностные	Предел текучести
			Временное сопротивление разрыву
		Пластические	Относительное удлинение
			Относительное сужение площади поперечного сечения
			...
		Упругие	Модуль Юнга
	Модуль сдвига		
	Электромагнитные	Электрические	Удельное сопротивление
			...
		Магнитные	Магнитная проницаемость
...			
Тепловые	Коэффициент теплопроводности		
	Удельная теплоемкость		
	Коэффициент линейного расширения		
	...		
Химические	Коррозионная стойкость		
	Химическая активность		
	Адсорбционная способность		

Характеристиками кристаллической решетки можно объяснить упругие константы, проводимость, намагниченность материалов; дислокациями – сопротивление пластической деформации, релаксация напряжений, электросопротивление.

До настоящего времени изучали зависимость свойств материалов от деформации, температурных воздействий после деформации, температуры, параметров легирования.

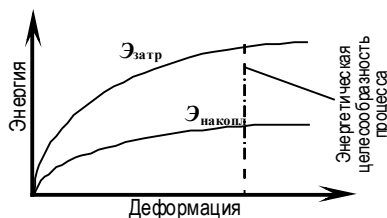
В последнее время начато изучение зависимости свойств от совместного воздействия деформации и температуры в процессе и после деформации, от изменения напряженного состояния металла в процессе деформации, от совместного воздействия температуры и магнитного поля, легирования.

В ОМД черных металлов основное внимание уделяют *механическим свойствам*, для достижения которых используют:

- холодное деформирование (*прочностные свойства*);
- термическую обработку после холодного деформирования (*прочностные + пластические свойства*);
- теплую деформацию (*прочностные свойства*);
- явление сверхпластичности (*пластические свойства*);
- высокотемпературную термомеханическую обработку, в том числе контролируруемую прокатку (*прочностные + пластические свойства*).

Холодное деформирование

При холодном деформировании происходит изменение параметров кристаллической решетки, увеличивается концентрация дислокаций (на 3–4 порядка), происходит накопление энергии. Энергия, затраченная на деформацию, есть сумма накопленной энергии и энергии деформационного разогрева (накапливается в дислокациях, их силовых полях). Чем больше деформация, тем меньше прирост накопленной энергии.



Энергетическая целесообразность процесса: при малых деформациях накопленная в меди энергия составляет 10%, от затраченной, а при больших – только 3%.

Изменение свойств металла при холодном деформировании широко используют для увеличения сопротивления металла деформации (σ_T), например, в методах поверхностного упрочнения.

Термическая обработка металла после холодного деформирования

Термическая обработка после холодного деформирования может быть использована для целей, недостижимых лишь термообработкой. В простейшем случае низкотемпературная обработка стали (ниже температуры рекристаллизации) – *отпуск холоднодеформированного металла* устраняет деформационное упрочнение, не изменяя размеров и формы зерен. Число дислокаций уменьшается. Отпуск металла может быть низкотемпературным (120–250°C), среднетемпературным (300–400°C) и высокотемпературным (450–600°C).

В отличие от отпуска при отдыхе изменяется только число точечных дефектов (вакансий), отдых идет при более низких температурах, чем отпуск.

Более глубокая термическая обработка – *отжиг металла*. Нагрев холоднодеформированного металла до температуры рекристаллизации приводит к выпадению и росту зерен (кристаллитов), размеры которых зависят от степени холодной деформации и температуры отжига.

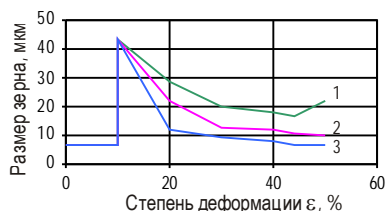
При $\epsilon=10\text{--}15\%$ зерна остаются в прежних границах. После разрушения границ зерна объединяются. Увеличение степени деформации свыше 15% приводит к росту числа зародышей новых кристаллитов, которые вырастают внутри объемов старых зерен. Чем больше зародышей, тем мельче зерна.

Явление рекристаллизации начинается при температуре:

$0,4T_{\text{плавл}}$ – для чистых металлов;

$0,6T_{\text{плавл}}$ – для однофазных твердых растворов;

$0,8T_{\text{плавл}}$ – для гетерофазных структур.

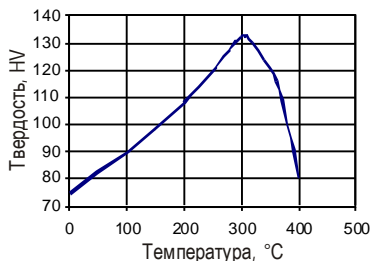


Зависимость размера зерна малоуглеродистой стали от степени деформации и температуры отжига:
1 – 850°C; 2 – 800°C; 3 – 700°C

Теплая деформация

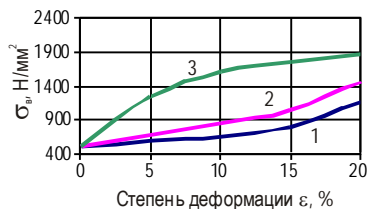
Для малоуглеродистых сталей с содержанием углерода 0,06–0,08% при пластической деформации при температуре 300°C наблюдается существенное увеличение прочностных свойств.

Повышение прочности при тепловой прокатке объясняется *деформационным упрочнением* и сопровождающим его *деформационным старением* (карбидообразованием).



Теплая прокатка

При нагреве до температур 50–300°C холоднодеформированной малоуглеродистой стали атомы углерода и азота устремляются к дислокациям, образуя вокруг «облака Коттрелла», и не позволяют им двигаться. При этом повышаются твердость и сопротивление деформации, снижаются пластические свойства. Это явление называют **деформационным старением**.



Интенсивность упрочнения металла в зависимости от процесса ОМД:

Примеры теплой деформации:

- прокатка трансформаторной стали с содержанием кремния до 6,0%;
- волочение быстрорежущей стали;
- листовая штамповка с электроконтактным подогревом;
- деформация железо-алюминиевых сплавов (8–16% алюминия).

1 – холодная прокатка;

2 – термообработка после холодной деформации;

3 – тепловая прокатка (300°C)

Явление сверхпластичности

Состояние сверхпластичности характеризуется рядом признаков:

- крайне незначительное деформационное упрочнение;
- аномально высокий ресурс деформационной способности;
- напряжение течения материала в несколько раз меньше предела текучести, характеризующего пластическое состояние данного материала;
- повышенная чувствительность напряжения течения материала к изменению скорости деформации.

Сверхпластичный материал относят к классу сложных вязкопластичных сред.

Признаки сверхпластичности проявляются при определенных условиях, среди которых принципиальное значение имеют структурное состояние деформируемого материала, температура и скорость деформации.

По структурному признаку различают:

- сверхпластичность у металлов и сплавов со сверхмелким зерном $d \leq 1,2 \times 10^{-6}$ мм (у обычного зерна $d = 2,5 \times 10^{-4}$ мм);
- сверхпластичность полиморфных металлов и сплавов, проявляющуюся при деформировании в процессе фазовых превращений. При этом *исходный размер зерен не имеет значения, но!* должны идти постоянные изменения фазового состава и структуры материала в процессе деформации.

По второму признаку сверхпластичность некоторых сплавов может быть обеспечена за счет *процессов деформации после термической обработки* с целью перевода структуры в метаста-

бильное состояние. Это явление открыто российским металловедом А.А. Бочваром.

Сплав 80% цинка + 20% алюминия, закаленный при температуре выше 300°C, с концентрацией, близкой к эвтектидной, при пластической деформации обнаруживает падение прочности при температуре 300°C до 2,0–2,5 Н/мм² и увеличение пластичности по удлинению до 650%, что объясняется эвтектидными превращениями, идущими при пластической деформации.

Чем больший объем занимают метастабильные структуры, тем больше сверхпластичность, которая также зависит от скорости деформирования.

Эвтектика – структура, состоящая из механической смеси двух или более твердых фаз, одновременно кристаллизовавшихся из жидкого сплава.

Метастабильные структуры – структуры, обладающие ограниченной устойчивостью и переходящие под влиянием внешних воздействий в другие более устойчивые состояния.

Признаки сверхпластичности металла при растяжении:

- не образуется шейка;
- происходит разупрочнение;
- все происходит при комнатной или пониженной температуре (нет окисления, повышенная прочность...).

Сверхпластичность обнаружена для сплава медь-алюминий при 550–660°C, для латуни Л-52 при 450–550°C, наблюдается в двухфазных сплавах, если они имеют мелкие равноосные зерна (1–4 мкм).

Сверхпластичность следует объяснять фазовыми превращениями, вызванными пластической деформацией.

Эффект сверхпластичности известен для сталей с 20% содержанием марганца и добавками кобальта и ванадия при γ - α -превращениях, если $\sigma \geq 100$ Н/мм², а также сталей с содержанием 30% никеля при 70°C при γ - α -превращениях.

Было высказано предположение, что снижение прочности вызвано действием внутренних напряжений второго рода (в зернах) от разности удельных объемов фаз, участвующих в превращениях.

Известно, что при циклических изменениях температуры таких сталей в диапазоне 870–930°C происходит нарастание деформации при очень низких напряжениях (1,0 Н/мм²). Это явление может быть использовано для разработки новых технологических процессов.

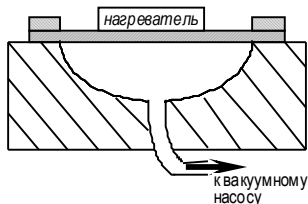
Аналогичный эффект повышения пластичности обнаружен и при деформации углеродистых марок стали (0,15–0,9% углерода), подшипниковых марок стали (1,0–1,5% хрома), когда удлинение происходит без образования шейки при напряжениях ниже предела текучести и достигает 500%. В хромисто-никелевых сталях (26% хрома + 6,5% никеля) при температуре 980°C удлинение достигает

600%, что позволяет прокатывать листы толщиной 0,5 мм из 10-тонных заготовок (слитков).

Недостатком сверхпластичности следует считать низкую скорость деформации.

Пример использования явления сверхпластичности: *вакуумно-газовая штамповка листов*.

Таким образом, *сверхпластичность обусловлена фазовыми превращениями, которые ослабляют межзатомные связи, снижают предел текучести и до конца фазовых превращений не позволяют развиваться деформационному упрочнению и, главное, связанному с ним увеличению числа дислокаций*. То есть в основе сверхпластичности лежит **эффект разупрочнения**.



Мелкое зерно + фазовые превращения (температура) + внешнее напряжение + рекристаллизация (но при низких температурах → помогает снять наклеп – протолкнуть дислокации (булат)).

Одним из способов предотвращения роста зерен является смешивание металла с другим веществом (с углеродом). Результат – сверхвысокоуглеродистые стали (содержание углерода ~1,5%). Такого содержания углерода достаточно для создания разветвленной сетки цементита, которая распространяется по всей металлической заготовке и препятствует росту зерен. Но такая сталь хрупкая.

Как известно, Индия является родиной булата (дамасской стали). Первые сведения о нем появились 2300 лет назад. Потом секрет этой стали был утерян.

В 1833 г. Павел Петрович Аносов в Златоусте изготовил первый булатный клинок заново. Для чего была использована высокоуглеродистая сталь, полученная в результате естественной кристаллизации: насыщение сплава большим количеством углерода ($[C]=1,3-1,5\%$). В условиях медленного охлаждения образовывалось и находилось в некотором избытке соединение FeC – цементит, который не растворялся, а оставался среди железа во взвешенном состоянии. Прослойки цементита медленно обволакивались остывающим мягким железом. Поэтому при высоком содержании углерода, что придает металлу твердость, булат сохраняет высокую вязкость и упругость, которых лишена обычная сталь. Из-за наличия прослоек хрупкого цементита отковка булата должна производиться крайне осторожно, ударами легкого молота с многократным нагревом до критической температуры (температуры красного каления), переход за которую ведет к потере булатом своих основных свойств и характерного рисунка. Процесс был очень трудоемким и требовал высокого искусства.

До 1980 г. не было возможности из булатной стали получить, например, ленту для лезвия безопасной бритвы.

В 80–90-х годах XX века созданы стали и сплавы для работы под давлением в сотни и тысячи атмосфер (при производстве аммиака требуется давление в 1000 атмосфер), при глубоком вакууме, когда давление близко к нулю (в электронных приборах давление составляет 10^{-7} мм рт. ст.), при температурах, близких к абсолютному нулю ($t=-273^{\circ}\text{C}$, хладостойкие, прочные стали и сплавы), для атомных реакторов с наибольшей магнитопроводностью, для двигателей реактивных самолетов и ракет (сталь, способная сохранять прочность при очень высоких температурах и больших нагрузках).

В Стенфорде в 1980 г. разработан способ непрерывной прокатки металла при постепенном его охлаждении от температуры 1120 до 650°С, а также последующей выдержки при данной температуре в процессе обработки. При этом цементитное соединение не затвердевает в виде обычной хрупкой решетки, а в результате непрерывной прокатки цементитные соединения превращаются во множество мелких частиц, располагающихся по границам зерен – металл становится не только сверхпластичным при умеренном нагреве, но и исчезает его хрупкость при комнатной температуре. Структура мелкозернистого сверхпластичного металла оказалась очень похожей на структуру материала древних дамасских клинков.

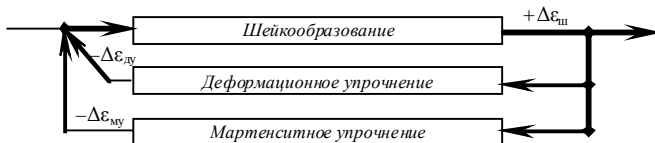
Явление пластичности, наведенной превращением (термомеханическая обработка – ТМО)

Для повышения пластичности стали используют явление ПНП – пластичность, наведенная превращением. В основе этого явления, используемого с целью повышения пластичности, лежит *эффект упрочнения*.

Пример. Аустенитная сталь с легирующими элементами не менее 1%: *Mo, Cr, Mn, V, W, Nb, Ta* при деформации $\varepsilon > 10\%$ при температуре 345°С повышает прочностные свойства за счет деформационного упрочнения и деформационного старения (карбидообразования). Образование карбидов при этом обедняет углеродом аустенитную матрицу и *при продолжении деформации* при постепенном понижении температуры в стали *идет мартенситное превращение* (фазовое превращение), **увеличивающее** одновременно **прочность** (вследствие образования мартенсита) и **пластичность**.

Таким образом можно повысить прочность стали X18P8 с 600 до 1500 Н/мм² в листе и до 2600 Н/мм² – в проволоке, так как деформация в шейке при растяжении приводит к большему упрочнению, чем к локальному уменьшению площади поперечного сечения (**интенсивность упрочнения в месте образования шейки выше интенсивности снижения площади поперечного сечения** (приращение деформации $\Delta\varepsilon_{III}$) **в этом месте**).

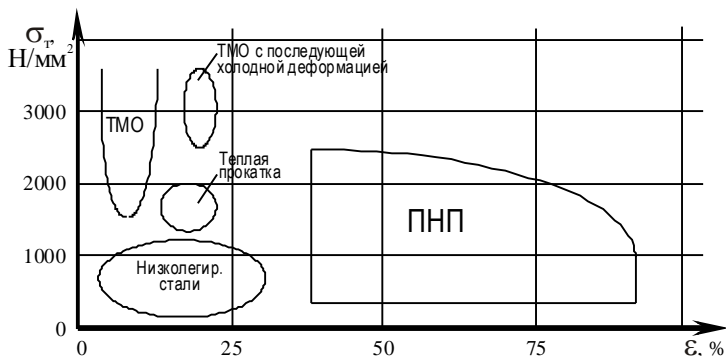
Процесс растяжения будет тем устойчивее, чем меньше будет приращение деформации в шейке ($+\Delta\varepsilon_{III}$).



Мартенситное упрочнение, чувствительное к деформации, играет роль отрицательной обратной связи, роль регулятора, обеспечивающего требуемое значение $\Delta\varepsilon_{III}=0$. В обычных сталях обратная связь действует только за счет деформационного упрочнения.

ПНП допускает деформационно-термическое упрочнение для железоникелевых сплавов после теплой прокатки (400–500°С) с $\varepsilon = 80\%$ и дополнительной прокатки при температуре жидкого азота и отпуска при температуре 350–450°С. При этом можно получить характеристики $\sigma_T > 2000$ Н/мм² и $\delta > 20\%$.

Применение ПНП затруднено, так как необходимо использовать сложное оборудование.



ТМО – термомеханическая обработка – совмещает пластическую деформацию с термической обработкой.

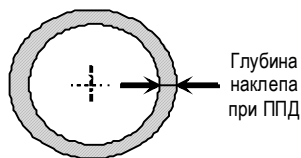
Мартенсит – пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе такой же концентрации, как у исходного аустенита, высокая твердость – микроструктура закаленных сплавов.

Свойствоизменение. Поверхностная пластическая деформация

При ОМД следует отличать свойства изделий от свойств материалов. Свойства изделий зависят от свойств материалов. Но в некоторых случаях целью ОМД является улучшение (изменение) свойств готового изделия, а не материала. Следовательно, при этом не должно происходить формоизменение.

К методам ОМД, когда в результате обработки происходит лишь изменение свойств изделия, относятся методы поверхностной пластической деформации (ППД): обкатка, выглаживание, дробеструйная обработка, а также дрессировка.

Эти методы изменяют свойства изделия за счет повышения прочностных свойств поверхностных слоев, изменения их шероховатости, а также величины и распределения напряжений в объеме тела в процессе ОМД (вместо поля с нуле-



выми значениями напряжений в поверхностных слоях возникает поле с напряжениями сжатия). Может изменяться и плотность изделия. Но все эти изменения происходят без формоизменения.

Обкатку производят шарами диаметром от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров. Усилие прижатия составляет несколько тысяч ньютонов. Коэффициент трения $f=0,07-0,12$. Глубина наклепа при обкатке шарами изделия из стали марки 45 составляет 0,5–3,0 мм.

Аналогичным обкатке является процесс **выглаживания** неподвижным алмазным шариком диаметром 0,5–3,5 мм, прижимаемым к обрабатываемой поверхности с силой 50–300 Н; $f=0,04-0,08$. Глубина наклепа – 0,15–0,4 мм.

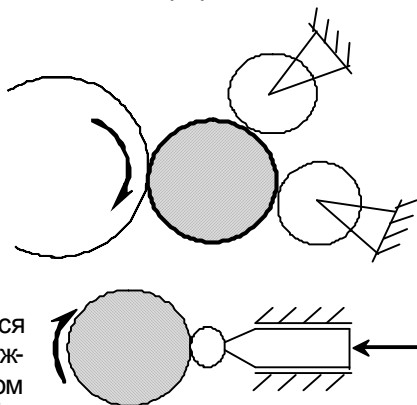
Осевые сжимающие напряжения могут достигать 2000 Н/мм², радиальные – 800 Н/мм². Это может быть вызвано как стремлением наружного слоя тела к пластическому формоизменению (он раскатан, но не отслоился и пытается растянуть внутренние, не обработанные пластически слои изделия), так и стремлением тела увеличить объем (плотность отожженной стали при холодной деформации уменьшается с 77,16 до 76,32 Н/мм². То есть деформация (не формоизменение!) изменяет свойства металлического изделия – плотность.

При высоких скоростях обработки (30–100 м/мин) температура контакта может повыситься до 250°С, на глубине 1,0 мм – до 100°С. При повышении скорости температура может достигать 500°С.

При высоких температурах и больших градиентах температурные напряжения могут вызвать пластическую деформацию. А высокие температурные напряжения и пластические деформации могут привести к структурно-фазовым превращениям (полезным и вредным):

- деформационное упрочнение является, в общем, полезным, однако, увеличение плотности дислокаций при этом может привести к субмикротрещинам;
- распад остаточного аустенита в перлитных структурах приводит к увеличению твердости на 12–16%, при этом возникает мартенсит деформации.

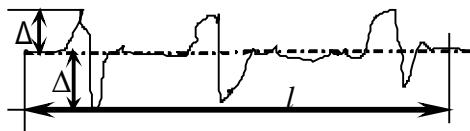
Кроме улучшения механических свойств металлического изделия и создания благоприятных остаточных напряжений, обкаткой и



выглаживанием можно решать задачи формоизменения: улучшать шероховатость изделий из незакаленных марок стали в 8–20 раз, закаленных – в 3–6 раз.

Шероховатость – форма поверхности твердого тела, рассматриваемая в пределах площадей, малых по сравнению с площадью поверхности тела. Шероховатость проявляется в виде микронеровностей: микровыступов и микровпадин. Значение этой характеристики велико. Например, площадь поверхности с учетом шероховатости будет больше площади поверхности, определенной по размерам тела. Площадь контакта двух плоских поверхностей, даже если они отшлифованы, будет на 30–40% больше, чем площадь, определенная по размерам. Шероховатость влияет на такие потребительские свойства, как *контактная жесткость, усталостная стойкость, покрываемость красками, пластмассами, эмалями, износостойкость, отражательная способность, штампуемость*.

Необходимо иметь определенную шероховатость для конкретных целей. Шероховатость оценивают как геометрическую характеристику поверхности тела, вернее, как профиль сечения поверхности плоскостью. Профиль оценивают по величине отклонений его точек от средней линии.



Шероховатость поверхности характеризуется:

- средним арифметическим отклонением профиля R_a (среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины l);
- высотой неровностей профиля R_z по десяти точкам (среднее значение абсолютных размеров пяти наибольших выступов и пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины).

При алмазном выглаживании среднюю высоту микровыступов R_a можно снизить до 0,08 мкм. При обкатке шарами можно получить поверхность изделия с регламентированными значениями микровыступов и микровпадин.

Еще одним методом поверхностной пластической деформации является **дробеструйная обработка**.

При ударе дробинок об обрабатываемую поверхность возникают напряжения, достаточные для выполнения условия пластичности.

Особенность метода – большое число инструментов – дробинок.

Задачи дробеструйной обработки – те же – *увеличить показатели усталостной стойкости детали, улучшить шероховатость (получить заданную шероховатость)*.

Дробинкам (чугунным, стальным, ...) диаметром 0,025–5,0 мм различной формы сообщают скорость до 100 м/с. Производительность установки составляет 6–1400 кг/мин.

Способы дробеструйной обработки:

- дробеструйный – подача дробы сжатым воздухом;
- дробеметный – с использованием центробежных сил;
- гидродробеструйный – подача дробы струей жидкости.

Температура контакта при ударе дробинки (при сухой обработке) достигает 600–1000°С. Максимальные касательные напряжения находятся в поверхностном слое обрабатываемого изделия до глубины (0,25–0,24) от диаметра дробы.



При гидродробеструйной обработке увеличиваются глубина наклепа ($1,5 d_{др}$) и диаметр лунки ($2,5 d_{др}$), выступы уменьшаются. Жидкостная подача дробы увеличивает производительность, упрощается конструкция установки, улучшаются условия труда.

Размеры сечений обрабатываемых деталей: длина – до 2000 мм; диаметр – до 2000 мм.

Дрессировка

Для улучшения свойств изделий может быть использована **дрессировка** – холодная прокатка отожженной листовой стали с малыми (0,5–3,5%) обжатиями. Цель дрессировки (как и при ПГД) – обеспечение изменения механических свойств (в частности, улучшение штампуемости) листового проката и создание остаточных напряжений.

Основные дефекты, возникающие при штамповке листового проката: проявление линий скольжения (Чернова-Людерса) и разрывы при деформировании при двухосном растяжении.

Необходимо улучшать показатели свойств материала:

- уменьшить σ_T / σ_B . Этот показатель показывает возможность больших деформаций после того, как началась деформация с упрочнением;

- увеличивать ($\varepsilon_B - \varepsilon_{нач.упр}$). Чем больше этот показатель, тем больше допустимые вытяжки листа при последующей штамповке;
- уменьшать показатель ($\varepsilon_{нач.упр} - \varepsilon_{нач.деф}$), что снижает вероятность проявления линий Чернова-Людерса (линий скольжения).

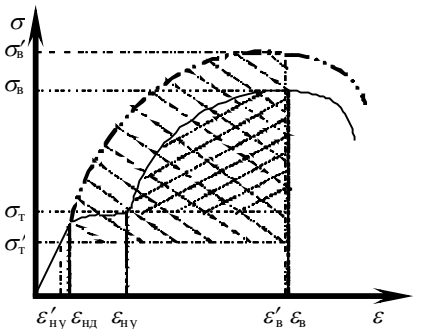
Известно, что при дрессировке σ_T уменьшается, а σ_B растет, что при последующей обработке давлением увеличивает допустимые вытяжки и уменьшает возможность разрывов при заданных показателях формоизменения (вытяжки).

Чтобы уменьшить вероятность проявления линий Чернова-Людерса (линий скольжения), следует уменьшить длину площадки текучести (а в пределе – ее устранить). Тогда линии скольжения на поверхности листа при штамповке появляться не будут.

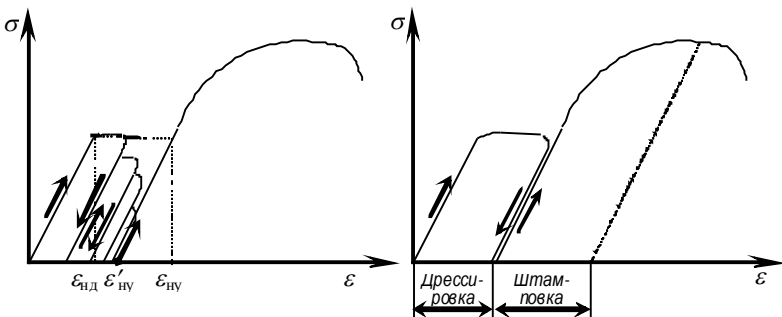
Необходимый эффект достигается тем, что при пластической деформации существует *гистерезис* – отставание следствия от причины – деформации от напряжения при снижении напряжения.

Повторное нагружение характеризуется уменьшением длины площадки текучести на величину гистерезиса деформации (на величину предварительной пластической деформации [при дрессировке]).

Поэтому при дрессировке величину степени пластической деформации делают равной величине степени деформации, соответствующей концу площадки текучести.



$\varepsilon_{НД}$ – начало пластической деформации;
 $\varepsilon_{НУ}$ и $\varepsilon'_{НД}$ – начало деформации супрочнением соответственно до и после дрессировки;
 ε_B и ε'_B – степень деформации, соответствующая временному сопротивлению разрыву;
 σ_T и σ'_T – предел текучести соответственно до и после дрессировки;
 σ_B и σ'_B – временное сопротивление разрыву



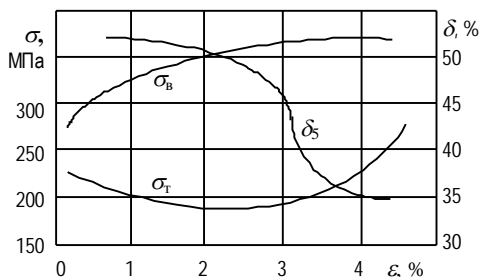
Вопрос. Почему при штамповке, ковке и растяжении линии Чернова-Людерса проявляются, а при прокатке и волочении нет?

Линии Чернова-Людерса являются локальными сдвиговыми деформациями по некоторым линиям максимальных касательных напряжений. Математическая теория пластичности не дает ответа на этот вопрос. Для объяснения проявления линий скольжения следует привлекать физическую теорию пластичности, изучающую явления на микроструктурном и дислокационном уровнях. Для некоторых металлов, в частности, для малоуглеродистых марок стали, известно явление потери локальной устойчивости деформирования («зуб текучести»), что связывают с появлением линий Чернова-Людерса, а объясняют особенностями структурного разрушения карбидных сеток либо особенностями увеличения числа дислокаций.

При прокатке деформация не начинается одновременно во всем объеме металла по толщине.

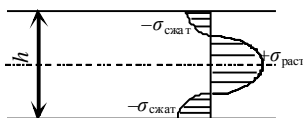
Результаты дрессировки зависят от диаметра валков, их шероховатости, смазки, натяжения. Температура дрессировки не должна превышать 40°C, так как в противном случае наряду с упрочнением идет процесс старения металла, которое восстанавливает площадку текучести.

Изменение механических свойств может быть достигнуто не только дрессировкой, но деформацией растяжения при знакопеременном изгибе. Однако при этом в металле не наводятся дополнительные напряжения, а процесс дрессировки (и только дрессировки!) сопровождается наличием остаточных напряжений.

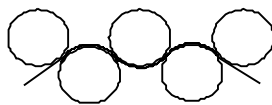


Установлено, что остаточные напряжения уменьшают скорость старения, улучшают штампуемость, то есть они полезны.

Максимальные остаточные напряжения могут достигать 0,8 σ_т. Кроме того, они приводят к тому, что пластическая деформация начинается не одновременно по всей толщине листа, а раздельно по слоям: либо в поверхностных (сжатых), либо средних (растянутых) слоях, тем самым уменьшая вероятность появления линий Чернова-Людерса.



Если остаточные напряжения уменьшить, то штампуемость ухудшается. Поэтому дрессированный листовой прокат нецелесообразно



Павлов И.М. Линии скольжения при прокатке. Экспериментальные данные // Пластическая обработка давлением металлов и сплавов: Сб. науч. тр. ин-та металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. М.: Наука, 1979.

разно подвергать правке на роликотправильных машинах. По этой же причине нецелесообразно уменьшать длину площадки текучести растяжением или знакопеременным изгибом, так как эти процессы не создают дополнительных остаточных напряжений.

При дрессировке наблюдается анизотропия свойств. При растяжении в одном направлении площадка текучести может быть, а в другом отсутствовать.

Дрессировку применяют и для улучшения формы полосы: обеспечения ее плоскостности, необходимой геометрии поверхности, причем, на каждой стороне листа может быть создана своя шероховатость, определяемая состоянием верхнего и нижнего валков.

Существует показатель – *коэффициент отпечатываемости шероховатости валков на поверхности полосы*

$$V = \frac{R_{\alpha \text{ полосы}}}{R_{\alpha \text{ валков}}}.$$

При дрессировке: при $D_{\text{валков}} = 450 \text{ мм}$ – $V = 0,05–0,75$;
 при $D_{\text{валков}} = 200 \text{ мм}$ – $V = 0,05–0,50$.

При дрессировке возможно создание неодинаковых остаточных напряжений не только по толщине листа, но и по его ширине. Это явление в Японии используют для улучшения штампуемости конкретных деталей в конкретных штампах: если предполагается склонность к волнистости листового изделия, то по кромке листа наводят дополнительные напряжения сжатия (соответственно в центральных слоях возникают дополнительные напряжения растяжения), если к коробоватости – их наводят в центральных слоях.

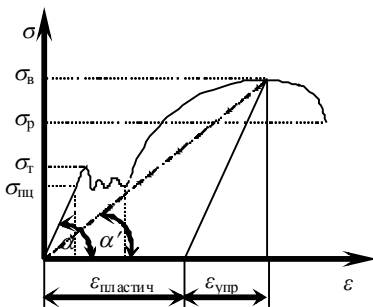
Раздел 5. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ОМД

Связь между напряжениями и деформациями

Связь между напряжениями и деформациями описывается *уравнениями связи* (они описывают поведение пластичных материалов в процессе нагружения). *Физические уравнения* или *уравнения связи* в теории пластичности носят нелинейный характер, что связано с изменением коэффициента пропорциональности ($\alpha - const$; $\alpha' - var$).

На *диаграмме растяжения* металлического образца (кроме свинца) видно, что упругое растяжение ограничено пределом пропорциональности ($\sigma_{\text{пц}}$), но его на практике уловить очень трудно.

Поэтому определяют предел текучести (σ_T или $\sigma_{0,2}$), при котором остаточная деформация не превышает 0,2%. При переходе тела из упругого состояния в пластическое существует «зуб текучести» – происходит разрушение карбидов зерен. При пластической деформации металлического тела обычно идет его упрочнение в результате:



- постепенного вступления в процесс пластической деформации менее благоприятно ориентированных зерен;
- дробления зерен и их заклинивания осколками;
- постепенного поворота зерен в результате пластической деформации;
- накопления дислокаций и их взаимодействия друг с другом.

Временное сопротивление разрыву (σ_b) – величина условная. Начинается образование шейки. В действительности же нагрузка растет, но из-за уменьшения площади поперечного сечения растягиваемого образца напряжение уменьшается.

Уравнения связи для зоны упругости

В зоне упругой деформации действует закон Гука.

Деформация, которая возникает от действия нормального напряжения σ_{11} по оси x_1

$$\varepsilon'_{11} = \sigma_{11} / E; \quad E = \operatorname{tg} \alpha \quad (E - \text{модуль упругости}).$$

От действия напряжения σ_{11} по осям x_2 и x_3 также возникают деформации

$$\varepsilon'_{22} = \varepsilon'_{33} = -\mu \sigma_{11} / E,$$

где μ – коэффициент Пуассона, связывающий максимальную продольную деформацию с поперечной, характеризует упругие свойства материала.

Аналогично можно записать деформацию от действия нормальных напряжений σ_{22} и σ_{33} в направлении осей x_2 и x_3 :

$$\varepsilon''_{22} = \sigma_{22} / E; \quad \varepsilon''_{11} = \varepsilon''_{33} = -\mu \sigma_{22} / E;$$

$$\varepsilon'''_{33} = \sigma_{33} / E; \quad \varepsilon'''_{11} = \varepsilon'''_{22} = -\mu \sigma_{33} / E.$$

Полное удлинение (линейная деформация) по оси x_1 равно сумме частных удлинений (деформаций).

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon'_{11} + \varepsilon'_{22} + \varepsilon'_{33} - \frac{1}{E} \left[\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33}) \right].$$

Суммируя частные линейные деформации и учитывая сдвиговые, запишем:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E} \left[\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33}) \right]; \quad \varepsilon_{12} = \frac{\sigma_{12}}{2G};$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E} \left[\sigma_{22} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{33}) \right]; \quad \varepsilon_{23} = \frac{\sigma_{23}}{2G};$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{1}{E} \left[\sigma_{33} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \right]; \quad \varepsilon_{31} = \frac{\sigma_{31}}{2G}.$$

Связь между линейным модулем и модулем сдвига выражает-ся зависимостью $G = E / [2(1 + \mu)]$ (G – const – модуль сдвига).

При описании поведения металла в пластической области можно предположить, что напряжения и деформации могут быть связаны зависимостью, формально совпадающей с законом Гука, **но!**, вместо коэффициентов пропорциональности E и G в уравнения входят переменные *модуль пластичности* E' и *модуль деформации 2-го рода* G' . Коэффициент Пуассона $\mu = 0,5$, так как изменение объема пренебрежимо мало.

Тогда для области пластической деформации (жестко-пластическая среда) система уравнений связи имеет вид:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E'} \left(\sigma_{11} - \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} \right); \quad \varepsilon_{12} = \frac{\sigma_{12}}{2G'};$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E'} \left(\sigma_{22} - \frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{2} \right); \quad \varepsilon_{23} = \frac{\sigma_{23}}{2G'};$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{1}{E'} \left(\sigma_{33} - \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} \right); \quad \varepsilon_{31} = \frac{\sigma_{31}}{2G'};$$

$$G' = E'/3.$$

Основное отличие модулей упругой зоны от модулей пластической зоны состоит в том, что E и G являются *константами материала*, а E' и G' зависят от скорости деформации, температуры, интенсивности упрочнения и др. Их определяют экспериментально, что вызывает значительные затруднения. Для определения

модулей E' и G' используют *гипотезу единой кривой* (отсутствие влияния вида напряженного состояния): *при сложном напряженном состоянии связь между интенсивностями напряжений и интенсивностями деформаций принимают такой же, как связь между напряжением и деформацией при простом нагружении того же тела*. То есть, получая в опытах при простом растяжении или сжатии материала коэффициенты E' и G' , их можно использовать для расчетов пластического течения металла при сложном нагружении по известным уравнениям связи.

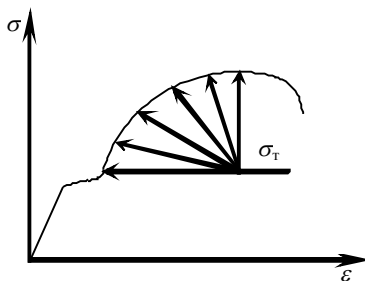
В случае больших деформаций вместо относительных деформаций принимают истинные деформации, допуская для упрощения равенство напряжений и деформаций во всех точках тела:

$$\delta_1 = \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right) / E'; \quad \delta_2 = \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) / E';$$

$$\delta_3 = \left(\sigma_3 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) / E'.$$

Условие пластичности

В теории ОМД под **пределом текучести** понимают **истинное нормальное напряжение, приводящее тело в пластическое состояние в процессе одноосного растяжения при заданных температуре, степени и скорости деформации**.



В процессе деформации предел текучести σ_T изменяется, поэтому его следует отличать от σ_T в теории упругости и сопромате. Там σ_T соответствует площадке текучести и величине остаточной деформации, равной $\varepsilon = 0,2\%$ при комнатной температуре и малых скоростях деформации. В дальнейшем σ_T будем

называть **сопротивлением пластической деформации**.

При объемном напряженном состоянии должно выполняться определенное соотношение между сопротивлением деформации σ_T и главными нормальными напряжениями для того, чтобы тело пластически деформировалось.

Имеются несколько выражений **условия пластичности**, показывающего, что тело перешло в пластическое состояние.

При линейном напряженном состоянии, например, при растяжении образца, пластическая деформация начнется тогда, когда нормальное напряжение достигнет величины предела текучести (сопротивления деформации) $\sigma_1 = \sigma_T$.

Условие постоянства максимального касательного напряжения (условие Треска–Сен-Венана)

В 1864 г. Г. Треска на основании опытных данных установил, что для начала пластической деформации максимальное касательное напряжение должно достигнуть определенной, постоянной для данного металла, величины.

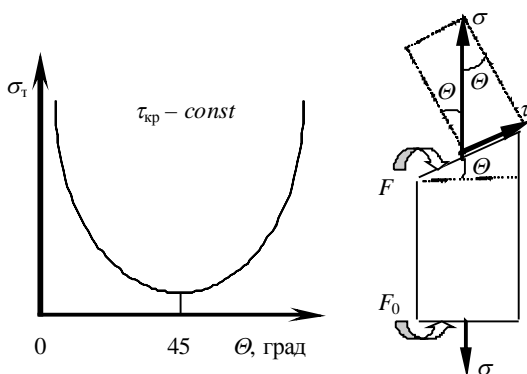
А. Сен-Венан на основании опытов Г. Треска предложил условие пластичности: тело начнет пластически деформироваться, когда максимальное касательное напряжение достигнет некоторого определенного значения, независимо от схемы напряженного состояния.

При линейном напряженном состоянии

$$\tau = \sigma_1 \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Theta = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\Theta .$$

Касательные напряжения достигнут максимума при $\Theta=45^\circ$.

$$\tau_{\text{макс}} = \sigma_T / 2 \quad \text{при} \quad \sigma_1 = \sigma_T .$$



При плоском напряженном состоянии (из кругов Мора):

$$\tau_{\text{макс}} = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 = \sigma_T / 2 .$$

При объемном напряженном состоянии:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T = 2\tau_{\text{макс}} \text{ при условии } \sigma_1 \succ \sigma_2 \succ \sigma_3.$$

То есть условие пластичности Треска–Сен-Венана может быть сформулировано: *пластическая деформация наступит тогда, когда максимальная разность главных нормальных напряжений достигнет величины сопротивления деформации.*

Энергетическое условие пластичности (условие Губера–Мизеса–Генки)

Согласно условию Треска–Сен-Венана переход тела из упругого состояния в пластическое определяется только разностью максимального σ_1 и минимального σ_3 напряжений и не зависит от величины среднего напряжения σ_2 .

М. Губер (1904 г.), З. Мизес (1913 г.) и Г. Генки (1921 г.) предложили новое условие пластичности, имеющее несколько формулировок.

Пластическая деформация наступает тогда, когда интенсивность напряжений достигает величины, равной пределу текучести (сопротивлению деформации).

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)} = \sigma_T.$$

То же в главных напряжениях

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_T.$$

Тогда условие пластичности, выраженное через интенсивность касательных напряжений:

$$\tau_i = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_T;$$
$$\tau_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_T.$$

Обычно условие пластичности записывают в виде

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) = 2\sigma_T^2$$

или в главных осях

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_T^2.$$

Если разность главных напряжений заменить касательными напряжениями, то получим

$$\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 = \sigma_{\tau}^2 / 2.$$

Условие пластичности может быть получено **из энергетического условия**: пластическая деформация тела наступит тогда, когда потенциальная энергия упругой деформации, направленная на изменение **формы тела**, достигнет определенного значения независимо от схемы напряженного состояния.

При линейном напряженном состоянии

$$A_{\phi}^L = A_{\pi}^L - A_o^L,$$

где A_{ϕ}^L – энергия или работа упругой деформации, затраченная на изменение формы тела при линейном напряженном состоянии; A_{π}^L – полная энергия упругой деформации при линейном напряженном состоянии; A_o^L – энергия или работа упругой деформации, затраченная на изменение объема тела при линейном напряженном состоянии.

Полная энергия деформации равна половине произведения напряжения на относительную деформацию

$$A_{\pi}^L = \sigma_1 \cdot \frac{\varepsilon_1}{2} = \frac{\sigma_1^2}{2E} \cdot \left(\varepsilon_1 \cdot \frac{\sigma_1}{E} \right) =$$

Энергия, затраченная на изменение объема, равна половине произведения среднего напряжения (гидростатического давления) на объемную деформацию

$$A_o^L = \sigma_{cp} \frac{\varepsilon_o}{2}.$$

Объемная деформация при линейном напряженном состоянии

$$\varepsilon_o = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{1-2\mu}{E} \sigma_1; \quad \sigma_{cp} = \frac{\sigma_1}{3},$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости.

Отсюда

$$A_o^L = \frac{\sigma_1^2 (1-2\mu)}{6E}.$$

Таким образом, энергия изменения формы в упругом состоянии

$$A_{\Phi}^L = A_{\Pi}^L - A_0^L = \frac{\sigma_1^2}{2E} - \left(\frac{\sigma_1^2}{6E} \right) (1 - 2\mu) = \frac{\sigma_1^2}{3E} (1 + \mu).$$

При пластической деформации энергия изменения формы

$$\sigma_1 = \sigma_T; \sigma_2 = \sigma_3 \quad \text{и} \quad A_{\Phi}^L = \frac{(1 + \mu)\sigma_T^2}{3E}.$$

Для объемного напряженного состояния

$$A_{\Phi}^V = A_{\Pi}^V - A_0^V.$$

Полная энергия – полусумма произведений напряжений на соответствующие деформации

$$A_{\Pi}^V = \frac{1}{2} (\sigma_{11}\varepsilon_{11} + \sigma_{22}\varepsilon_{22} + \sigma_{33}\varepsilon_{33} + 2\sigma_{12}\varepsilon_{12} + 2\sigma_{23}\varepsilon_{23} + 2\sigma_{31}\varepsilon_{31}).$$

В последнее уравнение подставим значения деформаций, выраженных через напряжения согласно закону Гука. Получим

$$\begin{aligned} A_{\Pi}^V &= \frac{1}{2E} \left\{ \sigma_{11} [\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33})] + \sigma_{22} [\sigma_{22} - \mu(\sigma_{33} + \sigma_{11})] + \right. \\ &\quad \left. + \sigma_{33} [\sigma_{33} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{22})] + \frac{1 + \mu}{E} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right\} = \\ &= \frac{1}{2E} \left[\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - 2\mu(\sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{33}\sigma_{11}) + \right. \\ &\quad \left. + (1 + \mu)(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right]. \end{aligned}$$

Энергия, затраченная на изменение объема при объемном напряженном состоянии

$$\begin{aligned} A_0^V &= \frac{\sigma_{cp}\varepsilon_0}{2} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \cdot \frac{1}{2E} \left[\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \right. \\ &\quad \left. + \sigma_{22} - \mu(\sigma_{33} + \sigma_{11}) + \sigma_{33} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \right] = \\ &= \frac{(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{6E} (1 - 2\mu). \end{aligned}$$

Тогда энергия изменения формы при объемном напряженном состоянии

$$A_{\Phi}^V = A_{\Pi}^V - A_0^V = \frac{1}{2E} \left[\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - 2\mu(\sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{33}\sigma_{11}) + (1+\mu)(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) - \frac{(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{3}(1-2\mu) \right] \Rightarrow$$

$$A_{\Phi}^V = \frac{1+\mu}{6E} \left[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right].$$

Условие пластичности определяется энергией формоизменения *независимо от схемы напряженного состояния*. Тогда

$$A_{\Phi}^V = A_{\Phi}^L;$$

$$\frac{1+\mu}{6E} \left[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right] =$$

$$= \frac{\sigma_T^2(1+\mu)}{3E} \Rightarrow$$

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) = 2\sigma_T^2. \quad (*)$$

Следует отметить, что условие пластичности (*) записано как **разность нормальных напряжений**, следовательно, изменение абсолютного значения нормальных напряжений на одну и ту же величину не приведет к изменению начала пластического течения. Однако величина деформирующих напряжений влияет на *пластичность металлов*.

Частные выражения условия пластичности

При ОМД встречаются частные виды напряженного и деформированного состояний: плосконапряженное, плоскодеформированное, осесимметричное.

Ввиду сложности условия пластичности (*) при решении практических задач обычно объемное напряженное состояние приближенно принимают соответствующим одному из этих видов. Это упрощает математическое выражение условия пластичности.

Для анализа условия пластичности вводят безразмерную величину – *направляющий тензор напряжения*

$$\xi_{\sigma} = \frac{\sigma_2 - (\sigma_1 + \sigma_3)/2}{(\sigma_1 - \sigma_3)/2}.$$

Подставим отсюда значение σ_2 в уравнение пластичности

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_T^2$$

и после преобразования получим

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3 + \xi_{\sigma}^2}} \cdot \sigma_T.$$

В правой части уравнения первый сомножитель является коэффициентом Лоде β . Тогда условие пластичности можно записать

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \cdot \sigma_T.$$

Ученый *В. Лоде* экспериментально проверил уравнение пластичности.

При заданных значениях главных напряжений σ_1 и σ_3 среднее напряжение σ_2 может меняться в пределах $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

Отсюда возможны следующие крайние случаи:

$$\sigma_2 = \sigma_1 \rightarrow \xi_{\sigma} = \frac{\beta}{1 - \beta} + 1;$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 \rightarrow \xi_{\sigma} = \frac{\beta}{\beta - 1} - 1;$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \rightarrow \xi_{\sigma} = 0; \quad \beta \approx 1,15.$$

Следовательно, уравнение пластичности Треска–Сен-Венана является частным случаем уравнения пластичности вида

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \cdot \sigma_T,$$

где $\beta = 1,0$.

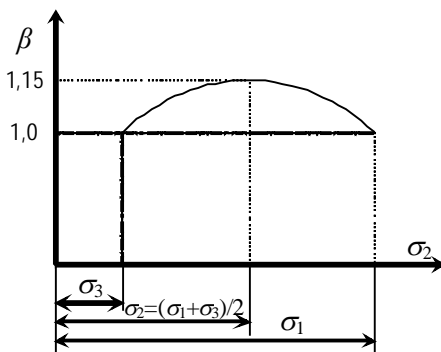
Таким образом, для плоскодеформированного состояния уравнение пластичности имеет вид

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \cdot \sigma_T = 1,15 \sigma_T,$$

$$\text{так как } \sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}.$$

Условие пластичности для плоского деформированного состояния в произвольных осях, принимая

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}; \quad \sigma_{12} = \sigma_{23} = 0;$$



$$\left(\sigma_{11} - \frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{2} - \sigma_{33} \right)^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6\sigma_{13}^2 = 2\sigma_T^2.$$

После преобразования имеем

$$(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 4\sigma_{13}^2 = \frac{4}{3}\sigma_T^2 = (2k)^2,$$

где k – постоянная пластичности – максимальное касательное напряжение (сопротивление чистому сдвигу при пластическом деформировании). $k = \sigma_T / \sqrt{3}$.

Подставляя k в условие пластичности для плоского деформированного состояния в главных напряжениях, получаем

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k, \text{ но } \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \sigma_{13} = \tau_{\text{макс}}.$$

Следовательно, k – максимальное касательное напряжение и в условиях *плоского деформированного состояния*, когда разность главных напряжений достигает максимального значения

$$\tau_{\text{макс}} = k (\sigma_1 = \sigma_3) / 2 = \beta \sigma_T / 2 = 0,577 \sigma_T.$$

В случае равенства σ_2 одному из крайних напряжений (σ_1 или σ_3) уравнение пластичности принимает вид (**осесимметричное напряженное состояние**)

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \tau_{\text{макс}} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 = 0,5 \sigma_T.$$

В случае **плоского напряженного состояния**

$$\sigma_{22} = 0; \quad \tau_{12} = \tau_{23} = 0$$

и уравнение пластичности имеет вид

$$(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + \sigma_{11}^2 + \sigma_{33}^2 + 6\sigma_{13}^2 = 2\sigma_T^2$$

или

$$\sigma_{11}^2 + \sigma_{33}^2 - \sigma_{11}\sigma_{33} + 3\sigma_{13}^2 = \sigma_T^2.$$

В главных напряжениях уравнение пластичности для плоского напряженного состояния

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2 = \sigma_T^2.$$

Это выражение можно записать, как $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \cdot \sigma_T$, где $\beta = 0$, но при этом нужно учитывать знаки напряжений, так как в зависимости от знака наибольшего σ_1 или наименьшего σ_3 напряжений, напряжение σ_2 , равное нулю, может быть максимальным, минимальным или средним.

Если σ_1 и σ_3 – положительные, то σ_2 минимальное, σ_1 – максимальное и σ_3 – среднее. Тогда уравнение пластичности имеет вид

$$\sigma_1 = \beta \cdot \sigma_T.$$

Если σ_1 и σ_3 – отрицательные, то σ_2 – максимальное, и при $\sigma_1 > \sigma_3$ уравнение пластичности имеет вид

$$-\sigma_3 = \beta \cdot \sigma_T.$$

Если σ_1 и σ_3 имеют различные знаки и $\sigma_1 > \sigma_3$ то σ_2 – среднее и уравнение пластичности имеет стандартный вид

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \cdot \sigma_T.$$

Аналитические методы определения напряжений и деформирующих усилий

При разработке технологических процессов обработки металлов давлением и проектировании оборудования необходимо знать усилие P , которое следует приложить к деформируемому телу для преодоления сопротивления пластической деформации и трения на поверхности его контакта с инструментом. По величине P определяют характеристики необходимого для деформации оборудования – усилие прессы, мощность двигателя прокатного стана и др.

В ряде случаев наряду с усилием необходимо знать распределение напряжений как на контактной поверхности металла с инструментом, так и по всему объему деформируемого тела, что позволяет оценить неравномерность деформации, качество продукции, пластичность и др.

Для определения деформирующих усилий, контактных напряжений, деформаций в обработке металлов давлением применяют аналитические (расчетные) и экспериментальные методы.

Аналитически усилие можно определить, зная нормальные и касательные напряжения в каждой точке поверхности контакта металла с инструментом, форму и размеры этой поверхности. Результаты расчета представляют в виде формул. Вводят понятие давления $p = \varphi(\sigma_T; f; V/H)$. Сопротивление деформации σ_T , в свою очередь, зависит от химического состава деформируемого металла, степени ε и скорости деформации u , температуры t .

Наиболее распространенными аналитическими методами определения усилия деформирования являются:

- метод характеристик (линий скольжения);
- энергетический метод с использованием вариационных принципов;
- метод совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и уравнения пластичности (инженерный метод).

Решение дифференциальных уравнений равновесия совместно с уравнением пластичности

Уравнения равновесия показывают зависимость напряжений от координат. В общем случае объемного напряженного состояния имеем три уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} = 0.$$

Уравнение пластичности связывает напряжения, необходимые для осуществления пластической деформации, с физическими свойствами деформируемого тела (сопротивление деформации σ_T).

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) = 6k^2 = 2\sigma_T^2.$$

Эти уравнения содержат 6 неизвестных (три нормальных и три касательных). Число уравнений меньше числа неизвестных. Присоединим к ним шесть *уравнений связи* (между напряжениями и деформациями):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{1}{3G'} \left(\sigma_{11} - \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} \right); & \varepsilon_{12} &= \frac{\sigma_{12}}{2G'}; \\ \varepsilon_{22} &= \frac{1}{3G'} \left(\sigma_{22} - \frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{2} \right); & \varepsilon_{23} &= \frac{\sigma_{23}}{2G'}; \\ \varepsilon_{33} &= \frac{1}{3G'} \left(\sigma_{33} - \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} \right); & \varepsilon_{31} &= \frac{\sigma_{31}}{2G'}\end{aligned}$$

(связь между модулями $G' = E'/3$)

и три уравнения неразрывности деформации:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 \varepsilon_{11}}{dx_2^2} + \frac{d^2 \varepsilon_{22}}{dx_1^2} &= \frac{2d^2 \varepsilon_{12}}{dx_1 dx_2}; \\ \frac{d^2 \varepsilon_{22}}{dx_3^2} + \frac{d^2 \varepsilon_{33}}{dx_2^2} &= \frac{2d^2 \varepsilon_{23}}{dx_2 dx_3}; \\ \frac{d^2 \varepsilon_{33}}{dx_1^2} + \frac{d^2 \varepsilon_{11}}{dx_3^2} &= \frac{2d^2 \varepsilon_{13}}{dx_1 dx_3}.\end{aligned}$$

В последних девяти уравнениях содержатся еще семь неизвестных: три линейные деформации, три деформации сдвига, модуль деформации второго рода G' (или модуль пластичности E').

В результате для объемного напряженного состояния имеем 13 уравнений с 13-ю неизвестными.

Решение этой системы уравнений в принципе возможно, так как число уравнений равно числу неизвестных, но практически эта задача *не разрешима* из-за большого числа неизвестных в частных производных.

Задача упрощается для частных случаев напряженно-деформированного состояния.

Для осесимметричного напряженного состояния имеем два уравнения равновесия, одно уравнение пластичности, четыре урав-

нения связи и одно уравнение неразрывности деформаций. Итого восемь уравнений с 8-ю неизвестными.

Для плоского напряженного и плоского деформированного состояний имеем два уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} = 0$$

и одно уравнение пластичности:

– для плоского напряженного состояния

$$\sigma_{11}^2 + \sigma_{33}^2 - \sigma_{11}\sigma_{33} + 3\sigma_{13}^2 = \sigma_T^2;$$

– для плоского деформированного состояния

$$(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 4\sigma_{13}^2 - (2k)^2 = 4\sigma_T^2/3,$$

где σ_{11} , σ_{33} – нормальные напряжения на произвольной площадке; σ_{13} – касательное напряжение; k – постоянная пластичности – максимальное касательное напряжение (сопротивление чистому сдвигу при пластическом деформировании). $k = \sigma_T/\sqrt{3}$.

Всего три уравнения с тремя неизвестными.

Несмотря на эти значительные упрощения задачи для осесимметричного, плоского напряженного или плоского деформированного состояния, для данных случаев также решено ограниченное число задач.

Более широкое применение получил метод *совместного решения приближенных уравнений равновесия и уравнения пластичности (инженерный метод)*. Его широко применяют для расчета усилий и расхода энергии при ОМД.

Метод основан на следующих положениях:

- напряженно-деформированное состояние принимают либо осесимметричным, либо плоским. При деформации тела сложной формы его условно разделяют на объемы, напряженно-деформированное состояние которых можно условно назвать плоским;
- дифференциальные уравнения равновесия для плоской задачи упрощают допущением, что нормальные напряжения зависят только от одной координаты. Благодаря чему остается только одно дифференциальное уравнение, в котором вместо частных производных можно принять обыкновенные (дифференциал).

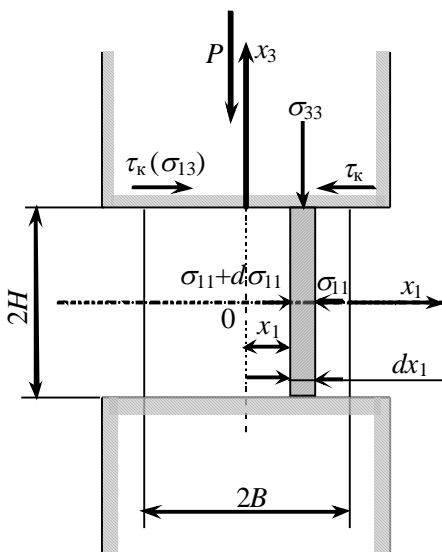
Последнее допущение исключает возможность определения напряжений в каждой точке деформируемого тела в отличие от метода совместного решения точных дифференциальных уравнений равновесия с уравнением пластичности и метода линий скольжения.

Инженерный метод позволяет определить напряжения только на контактной поверхности деформируемого тела с инструментом, по которым затем можно найти усилие деформации.

Рассмотрим применение метода совместного решения приближенных уравнений равновесия и уравнения пластичности на примере осадки полосы неограниченной длины между плоскими шероховатыми плитами. Задача впервые решена Е.П. Унковым. Начало координат расположим в центре образца. Так как длина образца (перпендикулярно плоскости чертежа) бесконечна, деформация в этом направлении будет пренебрежимо мала, то есть это случай *плоского деформированного состояния*. Вследствие симметрии полосы относительно оси x_3 определим напряжения для правого сечения.

Выделим в теле бесконечно малый объем dx_1 , длину этого объема примем равной единице, приложим к нему все силы и примем допущения:

- деформация плоская (допущение 1);
- искажением формы пренебрегаем (2);
- нормальные напряжения σ_{33} не зависят от оси x_3 , то есть постоянны по высоте и зависят только от координаты x_1 (3);
- касательные напряжения σ_{13} не зависят от оси x_1 (4).



Принимаем эти величины компонентами функции *только одной переменной*.

Систему уравнений равновесия для объемного состояния переводим в систему для плоского деформированного состояния.

$$\begin{array}{c}
 \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} = 0; \\
 \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} = 0; \\
 \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} = 0.
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{Допущение 1} \\
 \text{Допущение 2} \\
 \text{Допущение 3}
 \end{array}
 \quad (1)$$

Допущение 4

Тогда уравнение равновесия будет иметь вид

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} = 0. \quad (2)$$

Но нас интересует деформирующее напряжение σ_{33} , а не σ_{11} .
 Условие пластичности для объемного состояния имеет вид

$$\begin{aligned}
 &(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + \\
 &+ 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) = 2\sigma_{\tau}^2.
 \end{aligned}$$

Для плоского деформированного состояния

$$\sigma_{22} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{2}; \quad \sigma_{12} = \sigma_{23} = 0,$$

тогда для контактной поверхности условие пластичности для плоского деформированного состояния примет вид

$$(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 4\sigma_{13}^2 = 4k^2 = \frac{4}{3}\sigma_{\tau}^2. \quad (3)$$

Продифференцируем уравнение пластичности по оси x_1 (по dx_1).

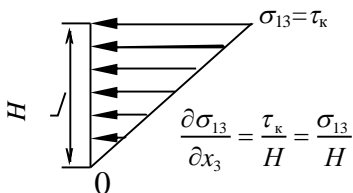
$$2(\sigma_{11} - \sigma_{33}) \left(\frac{d\sigma_{11}}{dx_1} - \frac{d\sigma_{33}}{dx_1} \right) - \underbrace{8\sigma_{13} \frac{d\sigma_{13}}{dx_1}}_{= 0 \Rightarrow \text{Допущение 4}}. \quad (4)$$

Так как σ_{13} не зависит от оси x_1 (допущение 4), правая часть уравнения (4) обращается в ноль. Получим

$$\frac{d\sigma_{11}}{dx_1} = \frac{d\sigma_{33}}{dx_1} = 0, \quad (5)$$

то есть в уравнение (2) можно вместо σ_{11} подставить σ_{33} . Но в уравнении равновесия (2) частная производная $\partial\sigma_{11}/\partial x_1$, а в уравнении (5) имеем дифференциал $d\sigma_{11}/dx_1$.

Допускаем (допущение 5), что напряжение σ_{13} — линейная функция. $\sigma_{13} = \tau_k$ — на контактной поверхности, а по мере удаления от контакта уменьшается по линейному закону, обращаясь в ноль в центре полосы (что подтверждается экспериментально).



Тогда частная производная $\frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x_1}$ в уравнении (2) будет зависеть только от координаты x_1 , то есть превращается в дифференциал, и из уравнения (5) может быть произведена подстановка $d\sigma_{11} = d\sigma_{33}$. Получим уравнение равновесия

$$\frac{d\sigma_{33}}{dx_1} + \frac{\sigma_{13}}{H} = 0. \quad (6)$$

Для решения этого уравнения необходимо принять какой-либо закон распределения касательных напряжений на контактной поверхности металла с инструментом. Выразить $\tau_k = \sigma_{13}$ через σ_{33} .

1. Принимаем (допущение 6) распределение трения на контактной поверхности **по закону Амонтона-Кулона**

$$\sigma_{13} = \tau_k = f\sigma_{33}. \quad (7)$$

Получим
$$\frac{d\sigma_{33}}{dx_1} + \frac{f\sigma_{33}}{H} = 0.$$

Определяем σ_{33}
$$\frac{d\sigma_{33}}{\sigma_{33}} = -\frac{f}{H} dx_1,$$

интегрируем
$$\ln \sigma_{33} = -\frac{f}{H} x_1 + c_1$$

или окончательно $\sigma_{33} = c_1 e^{-\frac{f x_1}{H}}$.

Отсюда $c_1 = \frac{\sigma_{33}}{e^{-\frac{f x_1}{H}}} = \sigma_{33} e^{\frac{f x_1}{H}}$.

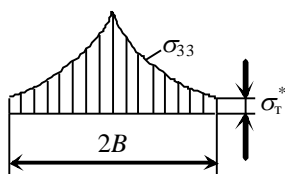
Постоянную интегрирования c_1 находим из граничных условий: при $x_1 = B$ (крайние точки) $\sigma_{33} = -\sigma_T^*$ (σ_T везде принимаем положительным, а σ_{33} в данном случае сжимающее, поэтому оно отрицательное).

$$\sigma_T^* = \beta \sigma_T = 1,155 \sigma_T.$$

От этого значения σ_{33} увеличивается по мере уменьшения x_1 .

$$c_1 = -\sigma_T^* e^{\frac{fB}{H}}.$$

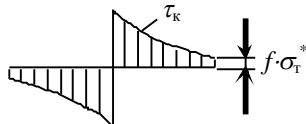
Следовательно, $\sigma_{33} = -\sigma_T^* e^{\frac{f}{H}(B-x_1)}$; (8)



$$\sigma_{13} = f \sigma_{33} - f \sigma_T^* e^{\frac{f}{H}(B-x_1)}, \quad (9)$$

где σ_T – сопротивление деформации; β – коэффициент Лодэ (для схемы плоского деформированного состояния $\beta = 1,15$).

Рассчитанные по формулам (8) и (9) эпюры имеют вид, показанный на рисунке.



Суммируя нормальные напряжения по контактной поверхности осаживаемой полосы, можно определить усилие деформирования на единицу ее длины

$$P = 2 \int_0^B \sigma_{33} dx_1 = 2 \sigma_T^* \int_0^B e^{\frac{f}{H}(B-x_1)} dx_1 = \sigma_T^* \frac{2H}{f} \left(e^{\frac{fB}{H}} - 1 \right); \quad (10)$$

давление металла на инструмент

$$p = \frac{P}{2B} = \sigma_T^* \frac{H}{fB} \left(e^{\frac{fB}{H}} - 1 \right). \quad (11)$$

Анализ эпюр:

– резко выраженный пик напряжений в середине полосы не подтверждается экспериментально;

- результаты расчета усилия деформирования дают завышенные данные по сравнению с фактическими;
- касательные напряжения не могут быть больше $\sigma_T^*/2$.

2. Принимаем (допущение 7) распределение трения на контактной поверхности **по закону Зибеля** (контактные касательные напряжения постоянны).

$$\sigma_{13} = \tau_k \equiv f\sigma_T^* \Rightarrow const. \quad (12)$$

Тогда уравнение равновесия будет иметь вид

$$\frac{d\sigma_{33}}{dx_1} = \frac{f\sigma_T^*}{H}.$$

Отсюда
$$\sigma_{33} = f\sigma_T^* \frac{x_1}{H} + c_1.$$

Постоянную интегрирования c_1 определяем из граничных условий:

при $x_1 = B$
$$\sigma_{33} = -\sigma_T^*; c_1 = -\sigma_T^* - f\sigma_T^* \frac{B}{H};$$

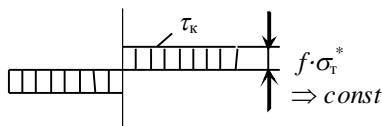
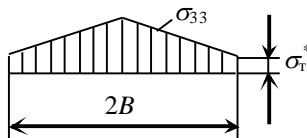
тогда:
$$\sigma_{33} = f\sigma_T^* \frac{x_1}{H} - \sigma_T^* - f\sigma_T^* \frac{B}{H}$$

или
$$\sigma_{33} = -\sigma_T^* \left[1 + \frac{f}{H}(B - x_1) \right]. \quad (13)$$

В этом случае эпюры нормальных и касательных напряжений имеют вид, показанный на рисунке.

Анализ эпюр:

- нормальные напряжения σ_{33} растут менее интенсивно, но в середине полосы пик ярко выражен;
- расчет усилия деформирования дает заниженные результаты по сравнению с фактическими;
- имеет место скачкообразное изменение касательных напряжений σ_{13} в середине полосы, что представляется маловероятным.



Усилие деформирования определяем по формуле:

$$P = 2 \int_0^B \sigma_{33} dx_T = 2\sigma_T^* \int_0^B \left[1 + \frac{f}{H}(B - x_1) \right] dx_1 = 2\sigma_T^* B \left(1 + \frac{fB}{2H} \right); \quad (14)$$

давление металла на инструмент

$$p = \sigma_{\tau}^* \left(1 + \frac{fB}{2H} \right). \quad (15)$$

3. Принимаем (допущение 8) что при переходе через середину полосы контактные касательные напряжения не имеют скачкообразного изменения, они изменяются по линейному закону

$$\sigma_{13} = -\sigma_{13}^B \frac{x_1}{B} - f \sigma_{\tau}^* \frac{x_1}{B}, \quad (16)$$

где $\sigma_{13}^B = f \sigma_{\tau}^*$ – значение касательного напряжения на краю полосы (при $x_1=B$).

При $x_1=0 \rightarrow \sigma_{13}=0$; при $x_1=B \rightarrow \sigma_{13}=\sigma_{13}^B$.

Таким образом, уравнение равновесия имеет вид

$$\frac{d\sigma_{33}}{dx_1} = \frac{\sigma_{13}^B \cdot x_1}{BH}.$$

После интегрирования

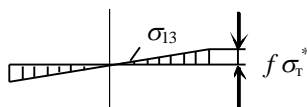
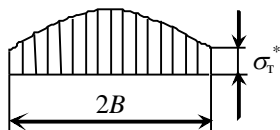
$$\sigma_{33} = \frac{\sigma_{13}^B x_1^2}{2BH} + c_1.$$

Постоянную интегрирования c_1 определяем из граничных условий:

при $x_1 = B \quad \sigma_{33} = -\sigma_{\tau}^*$; $c_1 = -\sigma_{\tau}^* - \sigma_{13}^B \frac{B}{2H}$.

Отсюда $\sigma_{33} = \frac{\sigma_{13}^B x_1^2}{2BH} - \sigma_{\tau}^* - \frac{\sigma_{13}^B B}{2H}$;

$$\sigma_{33} = - \left[\sigma_{\tau}^* + \frac{\sigma_{13}^B}{2BH} (B^2 - x_1^2) \right]. \quad (17)$$



Эпюры нормальных и касательных напряжений на контактной поверхности имеют вид, показанный на рисунке.

При этом усилие деформирования определяем по формуле

$$P = 2 \int_0^B \left[\sigma_{\tau}^* + \frac{\sigma_{13}^B}{2BH} (B^2 - x_1^2) \right] dx_1 = 2\sigma_{\tau}^* B \left(1 + \frac{\sigma_{13}^B B}{3H\sigma_{\tau}^*} \right); \quad (18)$$

давление

$$p = \sigma_T^* \left(1 + \frac{\sigma_{13}^B B}{3H\sigma_T^*} \right) \sigma_T^* \left(1 + \frac{fB}{3H} \right). \quad (19)$$

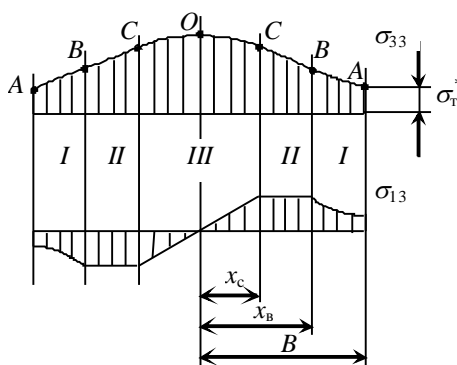
Анализ эюр:

- нормальные напряжения распределены по параболе;
- расчетное значение усилия деформирования меньше экспериментального.

Известны экспериментальные данные по определению фактической формы эюр нормальных и касательных напряжений при различных значениях коэффициента трения f и отношения ширины к высоте осаживаемого образца B/H . Это дает возможность предположить, что в действительности эюры контактных напряжений состоят из отдельных участков, на которых реализованы все три закона.

В общем случае эюры нормальных и касательных напряжений состоят из трех зон (участков).

Первая зона AB – скольжения. Нормальные напряжения растут



по экспоненте; касательные напряжения также увеличиваются по экспоненте. Металл скользит по инструменту. Контактные касательные напряжения подчиняются закону Амонтона-Кулона (см. допущение 6). Увеличение касательных напряжений на участке AB может происходить до величины $\sigma_{13} = -\sigma_T^*/2$. Участок AB переходит в участок BC .

Вторая зона BC – торможения. На участке торможения равновероятны скольжение металла по инструменту и сдвиги внутри металла по плоскостям, параллельным плоскости контакта. Нормальные напряжения увеличиваются по линейному закону, касательные напряжения постоянны, что соответствует закону Зибеля (см. допущение 7).

Третья зона CO – прилипания. Касательные напряжения изменяются по линейному закону, проходя через ноль в середине полосы, нормальные – по параболе, имея максимум на оси полосы.

Протяженность зон AB , BC , CO зависит от величины коэффициента трения f и отношения геометрических размеров полосы B/H .

Абсциссу границы зон торможения и скольжения x_B (участков $I-II$) можно определить, приравнявая правые части выражений (8) (допущение 6) для σ_{33}^I и (13) (допущение 7) для σ_{33}^II , когда $\sigma_{33}^II = -\sigma_{\tau}^*/2f$, так как $\sigma_{13}^{\max} = -\sigma_{\tau}^*/2$.

$$\sigma_{33}^I = -\sigma_{\tau}^* e^{\frac{f}{H}(B-x_1)}; \quad \sigma_{33}^II = -\sigma_{\tau}^* \left[1 + \frac{f}{H}(B-x_1) \right];$$

$$x_B = B - H \frac{\ln 2f}{f}.$$

Так как $f \leq 0,5$, то $\ln 2f < 0$.

Принимая $\frac{|\ln 2f|}{f} = \psi$, получим

$$x_B = B - H\psi.$$

Значение ψ зависит от f :

f	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
ψ	46,0	16,1	8,04	4,60	2,78	1,70	1,02	0,56	0,24	0,00

Протяженность зоны скольжения (I) $B - x_B = \psi \cdot H$.

Нормальное напряжение σ_{33} в зоне скольжения изменяется от значения $-\sigma_{\tau}^*$ на краю полосы до $\sigma_{33}^B = -\frac{\sigma_{\tau}^*}{2f}$.

Текущее значение нормальных напряжений в зоне I может быть определено по формуле

$$\sigma_{33}^I = -\sigma_{\tau}^* e^{\frac{f}{H}(B-x_1)};$$

касательных

$$\sigma_{13}^I = f \sigma_{33}^I.$$

II участок (зона торможения) начинается в т. B и заканчивается в т. C . Согласно экспериментальным данным установлено, что за границу зоны прилипания (III) можно принять абсциссу, равную толщине образца $x_c \approx 2H$. Протяженность зоны торможения от

$x_c=2H$ (толщина осаживаемой полосы принята равной $2H$) до $x_B=B-\psi H$. Нормальное напряжение на участке II изменяется от $\sigma_{33}^B = -\frac{\sigma_T^*}{2f}$ до $\sigma_{33}^C = \frac{-\sigma_T^*}{2f} \left[1 + \frac{f}{H}(x_B - 2H) \right]$ и текущее его значение может быть определено

$$\sigma_{33}^{II} = -\frac{\sigma_T^*}{2f} \left[1 + \frac{f}{H}(B - \psi H - x_1) \right]$$

с учетом подстановки значения σ_{33} в т. x_B ;

$$\sigma_{13}^{II} = \frac{\sigma_T^*}{2} \Rightarrow const.$$

III зона – прилипания – имеет протяженность от т. C до т. O. Нормальные напряжения распределены по закону

$$\sigma_{33}^{III} = -\sigma_T^* \left(\frac{4H^2 - x_1^2}{8H^2} + \frac{1}{2f} + \frac{x_B - 2H}{2H} \right)$$

с учетом значения в т. C;

$$\sigma_{13}^{III} = \frac{\sigma_T^* x_1}{4H}.$$

В общем случае для всех участков эпюры усилия деформирования

$$P = 2L \left\{ \int_{B-\psi H}^B \sigma_T^* e^{\frac{f}{H}(B-x_1)} dx_1 + \int_{2H}^{B-\psi H} \frac{\sigma_T^*}{2f} \left[1 + \frac{f}{H}(B - \psi H - x_1) \right] dx_1 + \int_0^{2H} \sigma_T^* \left(\frac{4H^2 - x_1^2}{8H^2} + \frac{1}{2f} + \frac{B - \psi H - 2H}{2H} \right) dx_1 \right\}.$$

Давление металла на инструмент

$$p = \frac{\sigma_T^* H}{fB} \left\{ \frac{1}{2f} - 1 - \frac{f}{3} + \frac{1}{2} \left(\frac{B}{H} - \psi \right) \left[1 + \frac{f}{2} \left(\frac{B}{H} - \psi \right) \right] \right\}.$$

Е.П. Унков сравнивал результаты расчета усилия осадки по приведенному методу решения приближенных уравнений равновесия совместно с уравнением пластичности и методу числен-

ного интегрирования с использованием линий скольжения. Расхождение полученных результатов не превышает 10%.

Анализ полученных эпюр:

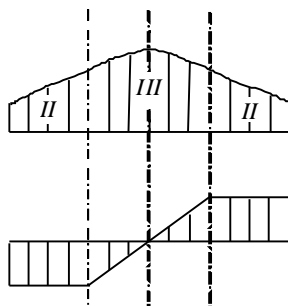
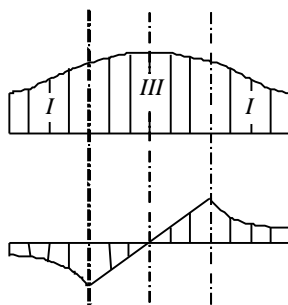
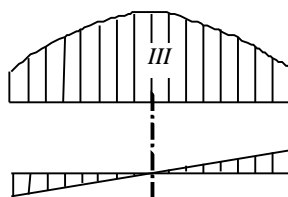
- протяженность участков *I*, *II* и *III* зависит от соотношения геометрических размеров осаживаемой полосы V/H и величины коэффициента трения f ;
- при ширине полосы $V \leq 2H$ участки *II* и *I* отсутствуют. Вся контактная поверхность является зоной прилипания (*III*);
- при $V/H > 2$, протяженность участков *I* и *II* зависит от величины f и V/H . В общем случае есть участки *I*, *II*, *III*.

При уменьшении f зона *I* растет, чтобы выйти на $\tau_{\max} = \sigma_{13} = \sigma_T^*/2$, а так как протяженность зоны *III* – *const* и определяется H , то протяженность зоны *II* уменьшается и при некотором f может быть равна 0. Имеем два участка: *I* и *III* (скольжения и прилипания). Эта эпюра может перерасти в 3-зонную при увеличении ширины полосы.

При значении коэффициента $f = 0,5$ скольжение металла по поверхности инструмента не происходит и участок *I* исчезает. Эпюра состоит из двух участков *III* и *II* (прилипания и торможения).

Таким образом, в зависимости от соотношения геометрических размеров полосы V/H и величины коэффициента контактного трения f при осадке возможны четыре вида эпюр, состоящих:

- из трех участков – скольжения, торможения и прилипания (*I*, *II*, *III*) при $V/H > 2 + \psi$ и $0,5 > f > 0$;
- из одного участка – прилипания (*III*) при $V/H \leq 2$ и $0,5 > f > 0$;
- из двух участков – скольжения и прилипания (*I* и *III*) при $2 + \psi > V/H > 2$ и $0,5 > f > 0$;
- из двух участков – торможения и прилипания (*II* и *III*) при $V/H \geq 2$ и $f \geq 0,5$.



Пластичность и разрушение

Пластичность – способность металлического тела остаточо изменять свою форму под воздействием внешних сил без разрушения.

Чем выше степень деформации до появления первых признаков разрушения тела, тем выше его пластичность.

Кинетика процесса деформации и разрушения

Процесс деформации металлов состоит из трех стадий:

- упругая деформация;
- пластическая деформация;
- разрушение (потеря сплошности).

Разрушение тела происходит путем разрыва межатомных связей в результате достижения нормальными напряжениями критического значения.

Некоторые авторы утверждают, что причиной разрушения могут быть и касательные напряжения. И тогда разрушение может происходить путем среза. Однако рассмотрение процесса разрушения на микроскопическом уровне свидетельствует о нарушении сплошности металла в результате отрыва. О разрушении под действием касательных напряжений не может быть и речи, так как они в случае отсутствия нормальных растягивающих напряжений являются лишь причиной деформации.

Необходимым условием нарушения сплошности в момент зарождения трещины является наличие растягивающих напряжений.

Какова кинетика (протекание) процесса разрушения?

*При пластической деформации, протекающей путем скольжения, происходят разрыв существующих межатомных связей и образование новых связей, не менее устойчивых, чем предыдущие. Если новые связи не образуются, происходит **разрушение**.*

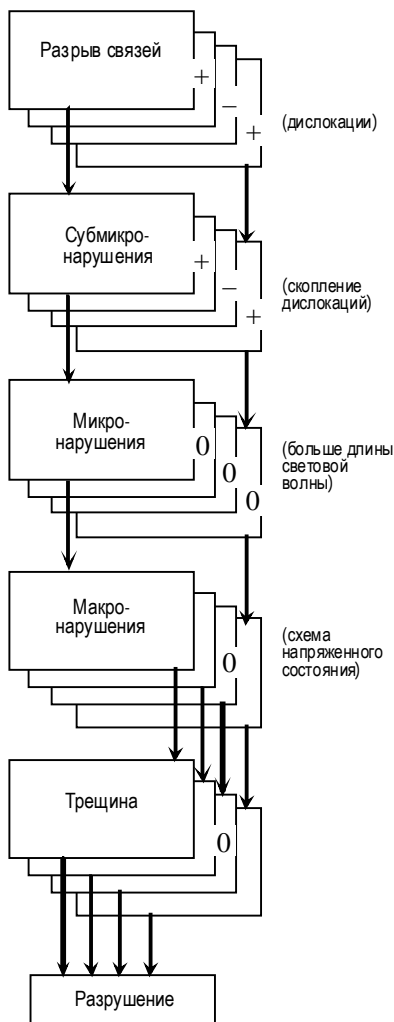
Современное состояние теории позволяет лишь схематически представить развитие и протекание процесса разрушения.

➤ Очевидно, разрушение тела начинается с микроскопических стадий – **нарушения небольшого числа атомных связей (дислокаций)**.

➤ В отдельных точках нагруженного тела возникает нарушение связей, вызывающее **субмикронарушения (скопление дислокаций)**.

➤ Одна часть субмикронарушений исчезает, другая – сохраняется устойчиво. Они развиваются и могут превратиться в **микронарушения** (больше длины световой волны).

➤ Микронарушения вызывают концентрацию напряжений в местах их появления и при определенных условиях (схема напря-



женного состояния, концентрация и др.) микронарушения могут перерасти в **макронарушения**.

➤ Развитие макронарушений (рост и объединение) связано с **разрушением** деформируемого тела.

Таким образом, в металле с развитой дислокационной структурой микротрещины зарождаются на самых ранних стадиях пластической деформации.

Металл, который подвергается пластической деформации, **всегда** имеет колоссальное количество микротрещин, которые не всегда приводят к разрушению (лопатки турбин).

Задачей производителей проката и его потребителей является предотвращение развития микротрещин.

Механизмы образования микротрещин дислокационного происхождения:

- скопление дислокаций у сильного препятствия: число дислокаций растет и они сливаются в одну трещину (объединение дислокаций). Количество дислокаций в деформированном металле в 10^3 – 10^4 раз больше, чем в отожженном;
- скопление дислокаций у «сидячей» дислокации (по Коттреллу);

- возникновение трещины в субмикроскопическом объеме. Скопление дислокаций, где их энергия (напряжение) достигает предельной величины;
- возникновение трещины в результате скольжения дислокаций по границам зерен.

Во всех случаях разрушение тела происходит не вследствие появления отдельных микротрещин, а в виду их достаточно боль-

шой концентрации, приводящей к объединению (микротрещин) и образованию макротрещин.

Разрушение идет в две стадии:

- возникновение и рост пор до трещин критического размера;
- быстрый рост трещин, приводящий к разрушению.

При достижении трещиной критического размера можно наблюдать разрушение двух видов:

- *вязкое* – распространение трещины вызывает пластическую деформацию в ее вершине;
- *хрупкое* – трещина распространяется, не вызывая пластической деформации.

Условия распространения могут быть различны (в металле трещина распространяется со скоростью звука в металле).

В *монокристаллах* при наличии растягивающих напряжений всегда есть условия для распространения трещин.

В *поликристаллах* препятствиями для распространения трещин являются (*условия залечивания*):

- границы зерен. Здесь трещина притупляется в результате протекания процесса пластической деформации в вершине;
- горячая деформация, которая способствует залечиванию дефектов. Трещина, возникающая путем слияния дислокаций, может расползтись путем диффузии. Рекристаллизованные зерна препятствуют распространению трещин, так как снимают излишние напряжения в районе трещин (снижение прочности металла при нагреве способствует прохождению пластической деформации в вершине трещины, то есть ее затуплению).

Поэтому *кинетическая теория трещин должна учитывать не только процесс зарождения трещин, но и их залечивание.*

Следовательно, *пластическое состояние металлического тела определяется соотношением скоростей образования зачатков субмикронарушений и их восстановления (залечивания).* В конечном итоге соотношение скоростей развития процесса нарушения сплошности и его залечивания определяет граничные условия пластического состояния тела.

Граничными условиями пластического состояния тела являются *хрупкость* (процессы разупрочнения полностью подавлены) и *сверхпластичность*.

Хрупкость $V_{\text{обр деф}} \gg V_{\text{залечив}}$

Сверхпластичность $V_{\text{обр деф}} \leq V_{\text{залечив}}$

Интенсификация процессов залечивания увеличивает время «жизни» деформируемого металла до момента разрушения. С момента достижения равновесия между процессами упрочнения и разупрочнения (залечивания) и дальнейшем сдвиге в сторону превалирования процессов разупрочнения материал переходит в состояние сверхпластичности, в котором он может деформироваться сколько угодно без видимых признаков разрушения.

Между этими полярными состояниями (*хрупкостью* и *сверхпластичностью*) находится *область обычной пластичности*, при которой имеет место превалирование процессов упрочнения над разупрочнением (залечиванием)

$$V_{\text{обр деф}} > V_{\text{залечив}}$$

Влияние механической схемы деформации на усилие деформирования и пластичность

Пластичность зависит от свойств вещества, температуры, скорости деформации, механической схемы деформации.

При использовании уравнения пластичности нужно учитывать не только величину главных напряжений, но и **их знак**.

При *одноименных* схемах напряженного состояния (всестороннее растяжение или всестороннее сжатие) уравнение пластичности имеет вид

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_T,$$

при *разноименных* схемах напряженного состояния

$$\sigma_1 + \sigma_3 = \beta \sigma_T.$$

В первом случае усилие деформации $\sigma_1 = \beta \sigma_T + \sigma_3$, во втором – $\sigma_1 = \beta \sigma_T - \sigma_3$.

Таким образом, при одноименной схеме напряженного состояния усилие деформации требуется больше, при разноименной – меньше.

Пластичность – способность тела остаточно изменять свою форму без разрушения. Чем выше степень деформации тела до появления первых признаков разрушения, тем выше его пластичность.

Механическая схема деформации может повысить или понизить природную пластичность деформируемого тела.

Так как разрушение тела происходит путем отрыва в результате достижения нормальными напряжениями критического значения, то можно установить, что *наибольшая пластичность металла получается при схеме напряженного состояния всестороннего неравномерного сжатия*, когда вероятность отрыва мала.

Это можно проиллюстрировать методом сопоставления показателей пластичности металла (α_1) по С.И. Губкину

$$\alpha_1 = \frac{|\sigma|_{\max} - \sigma_{\text{ср}}}{2|\sigma|_{\max}},$$

где σ_{\max} – максимальное по абсолютной величине главное напряжение.

Чем больше α_1 , тем пластичнее металл.

По диаграмме пределов изменения α_1 для различных схем главных напряжений можно записать:

- для одноосного растяжения $\alpha_1=1/3$;
- для трехмерного сжатия $\alpha_1=5/6$.

То есть при переходе от схемы деформации одноосного растяжения к схеме трехмерного сжатия теоретически можно увеличить пластичность в 2,5 раза.

На пластичность оказывает влияние не только схема главных напряжений, но и их *абсолютная величина*, которая характеризуется *средним* или *гидростатическим давлением*

$$\sigma_{\text{ср}} = p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}.$$

Чем больше величина среднего давления сжатия, тем выше пластичность. При этом металл уплотняется и всевозможные нарушения сплошности ликвидируются. Влияние высокого гидростатического давления на повышение пластичности экспериментально доказал Карман, получив 9% остаточной деформации таких хрупких материалов, как мрамор и песчаник. Позднее М.В. Растегаевым была получена деформация мрамора 78%.

Итак, пластичность зависит не только от свойств металла, но и от механической схемы деформации. Поэтому *пластичность – не свойство металла, а его состояние*. Хрупкий по природе металл можно привести в пластическое состояние при надлежащей механической схеме деформации и наоборот.

При разработке технологических процессов ОМД следует стремиться к созданию условий, обеспечивающих достаточную пластичность металла при наименьших усилиях.






Самую высокую пластичность обеспечивает схема всестороннего неравномерного сжатия.

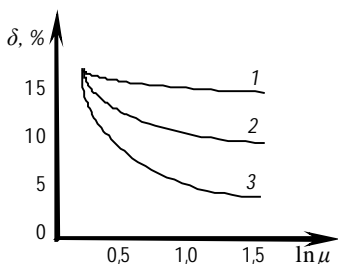
Схема всестороннего растяжения характеризуется низкой пластичностью и требует больших усилий. На практике ее не приме-

няют, но она может возникнуть при обработке давлением в отдельных частях деформируемого тела.

При разноименных схемах напряженно-деформированного состояния требуются усилия, пониженные по сравнению с одноименными. Пластичность находится между показателями пластичности схем всестороннего сжатия и всестороннего растяжения.

Механические схемы деформации основных технологических процессов

Процесс	Схема напряженного состояния (σ)	Схема деформированного состояния (ε)	Усилие деформации	Пластичность
Прессование			Высокое	Отличная
Прокатка листов			Высокое	Хорошая
Осадка			Среднее	Удовлетворительная
Волочение			Низкое	Пониженная



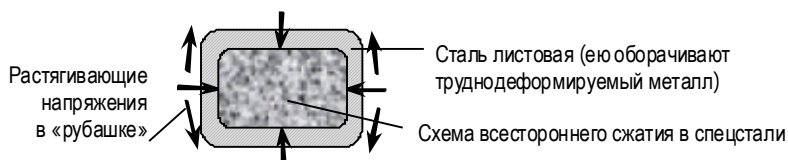
Зависимость пластичности металла (сплав Mg6) от степени деформации и схемы холодной ОМД:

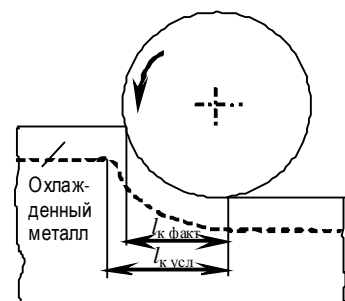
- 1 – раскатка (поперечно-винтовая);
- 2 – холодная прокатка;
- 3 – волочение

Из таблицы видно, что пластичность зависит не только от схемы напряженного состояния, но и от схемы деформированного состояния.

Труднодеформируемые стали обрабатывают путем прессования.

На практике для увеличения пластичности стараются всячески избегать появления растягивающих напряжений в деформируемом металле: подбирают специальные режимы обжатий (теория прокатки), разрабатывают системы калибровок (технология прокатки). Разработан способ уменьшения растягивающих напряжений путем деформации в замкнутом контуре («рубашке»).





Для увеличения глубины проникновения деформации поверхность металла захлаживают, при этом как бы увеличивается площадь поверхности инструмента (бойка или валка), увеличивается соотношение длины очага деформации (l_k) к его высоте.

Чем больше l_k , тем глубже проникает деформация к центру металла по толщине, а следовательно, там не

возникают растягивающие напряжения, **но!**, возникает схема, аналогичная прокатке биметалла.

Универсальным способом повышения гидростатического давления, а следовательно, и пластичности, при любой схеме деформации является метод обработки в жидкостях высокого давления. Высокое давление уменьшает растягивающие напряжения, подавляет процесс зарождения трещин.

Жидкость в качестве инструмента применяют при гидростатическом прессовании – *гидроэкструзии* (давление жидкости составляет – 10–50 тыс. атм.). В процессе гидроэкструзии удастся не только деформировать очень хрупкие металлы и сплавы, но и получать в таких металлах, как молибден, пластические свойства как наследственные.

Методы оценки пластичности (критерии пластичности)

При разработке режимов ОМД важно иметь характеристики природной пластичности металла для выбора механической схемы деформации, назначения температурно-скоростных режимов.

Для оценки природной пластичности применяют показатели:

– *относительное удлинение образца при разрыве*

$$\delta = l_1 - l_0 / l_0 ;$$

– *относительное сужение площади поперечного сечения*

$$\psi = F_0 - F_1 / F_0 .$$

Данные показатели определяют при *растяжении образцов* при температурах и скоростях деформации, отвечающих реальным условиям технологических процессов (в отличие от материаловедения, где эти показатели определяют при комнатной температуре и малых скоростях деформации).

Для оценки пластичности также применяют следующие методы:

- *кручение цилиндрических образцов* (механическая схема деформации характеризует чистый сдвиг);
- *осадка цилиндрических образцов* до появления первой трещины на боковой поверхности (характеризует поведение металла при свободной ковке);
- *гиб листов, штамповка на приборе Эриксона* до появления первой трещины (характеризует поведение металла при глубокой вытяжке);
- *прокатка клиновидных образцов*. При этом обжатие по длине образцов меняется и показателем пластичности служит *степень деформации, при которой образовалась первая трещина на боковой поверхности* (характеризует технологическую пластичность при горячей прокатке).

М.А. Зайков и В.Н. Перетяшко предложили критерий пластичности, который не зависит от схемы напряженного состояния и от метода его определения (растяжение, осадка и др.). За меру пластичности принята деформация сдвига – *истинный сдвиг по октаэдрической площадке* γ_8 .

Влияние схемы напряженного состояния на деформируемость учитывается критерием напряженности n – как отношение деформирующего (рабочего) напряжения p к сопротивлению деформации

$$n = p / \beta \sigma_{\tau} = p / (\sigma_1 - \sigma_3).$$

Критерий пластичности $\Pi = \gamma_8 / n$;

$$\gamma_8^2 = \tau_8^2 / G'^2,$$

где G' – модуль сдвига второго рода.

Переходя к истинным деформациям и принимая деформацию равномерной, получим

$$\gamma_8^2 = \frac{4}{9} [(\delta_1 - \delta_2)^2 + (\delta_2 - \delta_3)^2 + (\delta_3 - \delta_1)^2].$$

Учитывая условие постоянства объема, можно записать:

$$\gamma_8^2 = \frac{4}{3} (\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2)$$

или, исключая $\delta_2 = -(\delta_1 + \delta_3)$, получим

$$\gamma_8^2 = \frac{8}{3} (\delta_1^2 + \delta_1 \delta_3 + \delta_3^2).$$

Данный критерий пластичности не учитывает залечивание дефектов и в явном виде – схему напряженного состояния. Поэтому для получения сравнимых результатов его необходимо привести к условиям линейного напряженного состояния.

Феноменологическая теория разрушения металлов

В 1970 г. В.Л. Колмогоров разработал феноменологическую теорию разрушения металлов при пластической деформации, которая получила широкое признание. Согласно ей вероятность разрушения металла при деформации в любых условиях может быть определена по величине **расчетной степени использования запаса пластичности ψ** .

Известно, что пластическая деформация сопровождается возникновением и развитием трещин.

Пораженность элементарного объема, окружающего данную частицу микродефектами, можно характеризовать скалярной величиной $\bar{\psi}$ – трещиноватостью.

Будем считать, что приращение $d\bar{\psi}$ за некоторый промежуток времени обратно пропорционально пластичности λ_p при реализуемом в данный момент напряженном состоянии K .

Таким образом,

$$d\bar{\psi}_1 = c_1 \frac{d\lambda}{\lambda_p} = c_1 \frac{H}{\lambda_p [K(\tau)]} d\tau,$$

где c_1 – коэффициент пропорциональности; $d\lambda$ – приращение степени деформации сдвига; λ_p – предельная степень деформации сдвига, мера пластичности металла; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; K – показатель напряженного состояния; σ – гидростатическое давление; T – интенсивность касательных напряжений.

$$K = \frac{\sigma}{T}; \quad \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3};$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

Считаем, что рассматривается стадия рождения и докритического подрастания трещин, причем, часть из них залечивается в ходе деформации.

Это обстоятельство записывают в виде

$$d\bar{\psi}_2 = -c_2 H d\tau ,$$

где c_2 – коэффициент пропорциональности, зависящий от напряженного состояния; $H d\tau$ – степень деформации сдвига.

Если $\sigma/T > 0$, то $c_2=0$ – залечивания нет; если $\sigma/T < 0$, то $c_2 > 0$ – происходит залечивание трещины (знак напряжения «+» – растяжение, «-» – сжатие).

Так как процессы развития микродефектов и их залечивания идут одновременно, то результирующее изменение трещиноватости будет

$$d\bar{\psi} = (c_1 - c_2 \lambda_p) \frac{H d\tau}{\lambda_p} .$$

Соотношение величин c_1 и c_2 определяет интенсивность охрупчивания ($d\bar{\psi} > 0$) или улучшения пластических свойств ($d\bar{\psi} < 0$) в результате малого акта пластической деформации со степенью деформации сдвига $H d\tau$.

Моменту разрушения соответствует некоторая трещиноватость $\bar{\psi}_p$, тогда *степень использования запаса пластичности*

$$\psi = \bar{\psi} / \bar{\psi}_p .$$

Обозначив $B = (c_1 - c_2 \lambda_p)$ (характеризует степень монотонности процесса), получим

$$d\psi = B(\tau) \frac{H d\tau}{\lambda_p} .$$

Предположив, что правая часть уравнения не зависит от ψ , после интегрирования получим

$$\psi = \int_0^t B \frac{H}{\lambda_p} d\tau .$$

Эта формула показывает степень использования запаса пластичности к моменту времени t .

Если принять, что в исходном недеформированном состоянии металл не имеет дефектов ($\psi=0$), а в момент разрушения $\psi=1$, то условие деформирования за период времени $0 \rightarrow t$ элементарного объема металла без разрушения будет иметь вид

$$\psi = \int_0^t B(\tau) \frac{H(\tau)}{\lambda_p [K(\tau)]} d\tau < 1,$$

где H , K , λ_p , B – известные функции, описывающие напряженно-деформированное состояние элементарного объема металла и его пластические свойства.

В первом приближении можно принять процесс деформирования *монотонным* $B(\tau)=1$ (*монотонный процесс* – когда траектория движения материальной частицы в процессе пластической деформации не меняется). Тогда степень использования запаса пластичности

$$\psi = \frac{\lambda}{\lambda_p [K(\tau)]}.$$

Физический смысл критерия ψ :

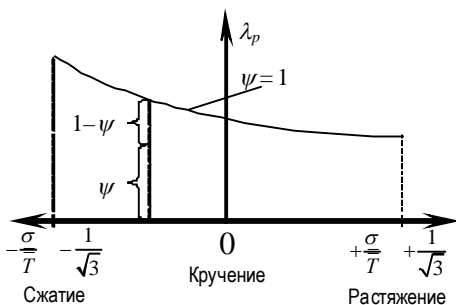
$$\psi = \frac{\lambda_{\text{процесса}}}{\lambda_{\text{разрушения}} \Big|_{K=\text{const}}},$$

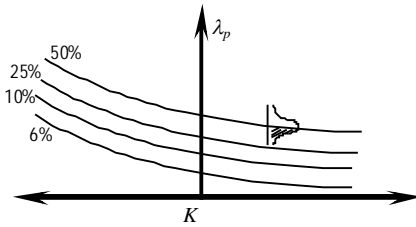
где λ – накопленная степень деформации сдвига, подсчитанная вдоль траектории движения материальной частицы; λ_p – предельная степень деформации сдвига при данном значении показателя напряженного состояния $K(\tau) = \sigma/T$.

В действительности же λ_p зависит от K . Зависимость $\lambda_p = f(\sigma/T)$ называют *диаграммой пластичности*.

Диаграммы пластичности строят по результатам экспериментальных исследований процессов кручения, сжатия, растяжения.

На диаграмме ψ – использованный запас пластичности; $(1-\psi)$ – оставший-





ся на данный момент запас пластичности при условии дальнейшей деформации путем сжатия.

Величина λ существенно различается при различных условиях ($K - var$), поэтому, выбирая процессы, которые соответствуют различным K , можно

регулировать запас пластичности (гидроэкструзия, прокатный стан, пресс, молот, и др.).

Следует помнить, что кривая диаграммы пластичности дает лишь 50%-ю гарантию разрушения, так как металлургическая продукция не имеет стабильных механических свойств, и данные, полученные для кривой, имеют статистический разброс.

Таким образом, условие деформирования без разрушения по В.Л. Колмогорову

$$\psi = \frac{\lambda}{\lambda_p [K(\tau)]} < 1.$$

Физический смысл $K = \frac{\sigma}{T}$.

$$\sigma = k\sigma_8; \quad T = k\tau_8; \quad k^2 = \frac{A_{\text{измен. объема}}}{A_{\text{измен. формы}}}, \text{ где } A - \text{ работа.}$$

Так как $dA = \sigma \cdot d\varepsilon = \frac{\sigma}{E} d\sigma = \sigma E \varepsilon; \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} - const;$

$$A = \int \frac{\sigma}{E} d\sigma = \frac{\sigma^2}{2E}.$$

При одноосном растяжении:

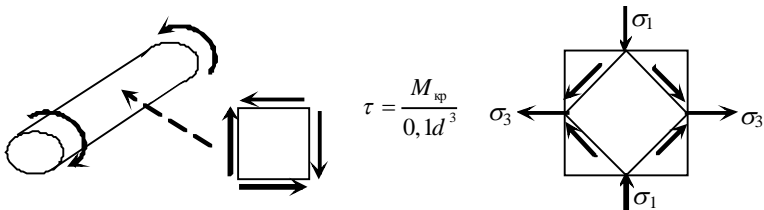


$$\sigma_1 = \sigma_{\text{раст}}; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0; \quad \sigma = \sigma_{\text{раст}} / 3;$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{2\sigma_{\text{раст}}^2} \frac{\sigma_{\text{раст}}}{\sqrt{3}}; \quad K = \frac{\sigma}{T} = \frac{\sigma_{\text{раст}} \sqrt{3}}{3\sigma_{\text{раст}}} + \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

При сжатии знак меняется на «минус», так как $\sigma_{\text{сжат}} < 0$.

При кручении существуют только касательные напряжения.



Такая схема может быть получена при определенной ориентации нормальных напряжений, причем $|\sigma_1| = |\sigma_3|$; $\sigma_1 > \sigma_2 = 0 > \sigma_3$;

$$\sigma_1 = -\sigma_3; \quad \sigma = \frac{\sigma_1 + (-\sigma_3)}{3} = 0.$$

Понятие о степени деформации сдвига (λ), ее вычисление и отличие от результирующей деформации ($\bar{\Gamma}$)

Степень деформации сдвига

$$\lambda = \int H d\tau.$$

Степень деформации при разрушении

$$\lambda_p = \int_0^{t_p} H d\tau,$$

где $H = \frac{2}{\sqrt{6}} \sqrt{(\xi_1 - \xi_2)^2 + (\xi_2 - \xi_3)^2 + (\xi_3 - \xi_1)^2}$; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; ξ_i – компоненты тензора скоростей деформации сдвига.

Результирующая (итоговая) деформация

$$\bar{\Gamma} = \frac{2}{\sqrt{6}} \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (u_2 - u_3)^2 + (u_3 - u_1)^2}.$$

Для монотонного процесса $\bar{\Gamma} = \lambda$, для немонотонного процесса $\bar{\Gamma} < \lambda$.

$$\xi = du/dt.$$

Признак монотонности – знак деформации для одного волокна не изменяется в процессе деформации.

Образец сначала растягиваем, потом – сжимаем. При этом результирующая деформация $\varepsilon = 0$, но есть наклеп, и металл получил

упрочнение. Кузнецы этот процесс называют *уковом*, то есть деформация равна нулю, а степень деформации есть (не равна нулю). *Физический смысл степени деформации*

$$\lambda = \int H d\tau \quad \text{— упрочнение,}$$

наклеп — определяется с точки зрения механики сплошной среды.

$\bar{\Gamma}$ — итоговая деформация определяет по размеру ячейки и не отражает историю нагружения.

λ — отражает историю нагружения (чтобы сломать проволоку, ее многократно перегибают). Это интегральная характеристика, является суммой главных скоростей деформаций.

Поэтому *теория течения* ($\sigma \rightarrow \xi$) является более состоятельной, чем *теория деформаций* ($\sigma \rightarrow \varepsilon$).

Для определения степени деформации существуют формулы:

$$\varepsilon = \Delta h/H; \quad \varepsilon = \Delta h/h; \quad \delta = \ln(h/H).$$

А почему бы не использовать формулу $\varepsilon = \Delta h/\sqrt{Hh}$?

Это не сама деформация, а *мера деформации*, она отражает не физический смысл, а лишь различные цифровые обозначения одной и той же деформации.

Деформация — это то, что подвергается тензорному анализу. Поэтому у различных исследователей наблюдаются противоречивые данные, так как они сравнивают разные вещи, а не действительную степень деформации.

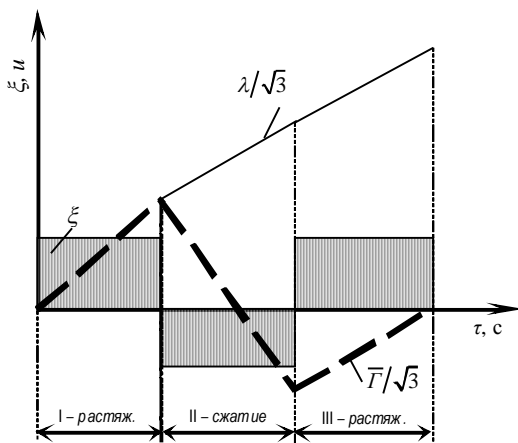
Правильнее строить зависимости $\lambda = \bar{\Gamma} = \sqrt{3}u$.

Для простого растяжения (одноосного) $u_1 > 0 > u_2 = u_3$.

Из условия постоянства объема

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0; \quad u_2 = u_3 = -\frac{1}{2}u_1;$$

$$\bar{\Gamma} = \frac{2}{\sqrt{6}} \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (u_2 - u_3)^2 + (u_3 - u_1)^2} = \sqrt{3}u_1.$$



Раздел 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССАХ ОМД

Обработка металлов давлением – один из заключительных этапов металлургического производства, связанный с проблемами деформирования и получения изделий требуемых формы, свойств, качества поверхности.

Разработка новых и эффективное совершенствование существующих технологических процессов связаны с вопросами определения оптимальных кинематических условий формоизменения, энергосиловых параметров, напряженного состояния в деформируемом теле.

Возникающее в процессах ОМД напряженное состояние в меньшей степени поддается аналитическому анализу. Теоретические исследования, проведенные с использованием вариационных принципов механики сплошных сред, требуют непосредственной экспериментальной проверки. Анализ напряженно-деформированного состояния с использованием метода характеристик (весьма приближенного) связан с началом пластического течения металла.

Трудности теоретического решения задач ОМД объясняются сложностью конфигурации обрабатываемого металла и инструмента, неполным учетом граничных условий, нелинейностью основных дифференциальных уравнений и т.д. Поэтому экспериментальные исследования часто являются единственно возможным методом решения некоторых задач ОМД.

Рассмотрим некоторые экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния металла при пластической деформации. Каждый из методов имеет ряд преимуществ и недостатков, поэтому нельзя рекомендовать какой-либо один метод для исследования различных процессов. Необходимо к каждой конкретной задаче подбирать свой метод. Сложилось мнение, что для конкретного решения задач пластического формоизменения необходимо совместное использование нескольких экспериментальных методов. Только в этом случае можно получить обширную подлинную информацию о напряженно-деформированном состоянии металла.

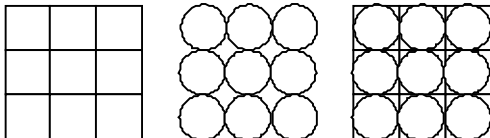
Исследование процессов пластического формоизменения металла с помощью метода координатных сеток

Метод сеток – один из старых и наиболее распространенных методов исследования. Он заключается в том, что сетка наносится на свободную поверхность изучаемого тела или на поверхность

предварительного физического сечения. Затем ее вид, искаженный деформацией, фиксируют и измеряют в целях дальнейшей математической обработки. При этом определяют *перемещения*.

Сетку в виде ячеек квадратного типа, окружностей или окружностей, вписанных в квадрат, наносят на поверхность исследуемой модели каким-либо путем (царапанием, выдавливанием, накаткой, перфорированием, наклейкой пленки с изображением сетки и др.).

Координатная сетка также может быть получена при наложении друг на друга двух негативов многослойных образцов, если эти слои расположены в продольном и поперечном



направлениях. Слоистые образцы представляют собой монолитную композицию из тонких цветных пластин или различных по цвету после травления черных металлов. Пластины соединяют горячим прессованием посредством твердых растворов замещения, образующихся путем диффузии.

Все экспериментальные методы исследования процессов пластического формоизменения, основанные на изучении искаженной деформацией сетки, можно разделить на три основные группы.

Методы, базирующиеся на основных положениях теории конечных деформаций

Основные параметры деформированного состояния в пределах, ограниченных ячейкой делительной сетки, определяют путем сопоставления конечных формы и размеров ячейки с исходными.

Метод конечной деформации применим только к тем процессам или их стадиям, которые удовлетворяют *условию монотонности* – когда главные оси скорости деформации совпадают с одними и теми же материальными волокнами и вид деформированного состояния в процессе пластической деформации остается неизменным.

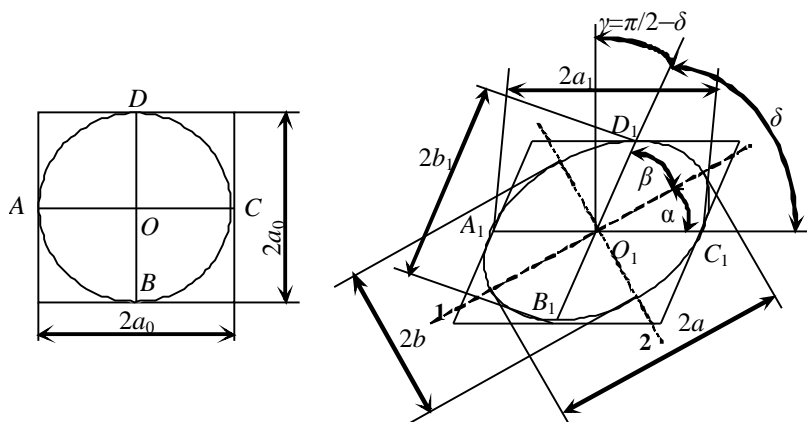
В этом случае интенсивность деформации вычисляют через значения главных компонентов тензора деформации

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2},$$

затем определяют физическое состояние тела и работу, затрачиваемую на его пластическое формоизменение.

Вычисление компонентов тензора напряжений связано с решением уравнения равновесия, а интенсивность напряженного состояния (σ_i) устанавливается в зависимости от интенсивности деформаций (ε_i) по данным испытаний материала на простое растяжение.

Для обработки результатов эксперимента используют *метод Зибеля*.



Исходная ячейка представляет собой квадрат с вписанной окружностью, которая после деформации превращается в параллелепипед и эллипс.

Методика расшифровки основана на теореме о преобразовании сферы в эллипсоид.

Главные компоненты деформаций определяют по уравнениям:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{a}{a_0} = \frac{1}{2} \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 + \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}}{2a_0^2};$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{b}{a_0} = \frac{1}{2} \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 - \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}}{2a_0^2}.$$

С учетом условия несжимаемости интенсивность деформации

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2}.$$

Существует также *методика Пашкова*, основанная на теореме превращения квадрата в параллелепипед.

Расчетные формулы и Зибея, и Пашкова таковы, что исходная ячейка должна быть обязательно квадратной. Погрешность в нанесении ортогональной сетки может привести к ошибке.

Поэтапные методы исследования напряженно-деформированного состояния

Методы основаны на деформационной теории.

Основной задачей поэтапного исследования является получение локальной характеристики степени деформации в результате немонотонного формоизменения в условиях сложного нагружения.

На каждом этапе все характеристики процесса формоизменения (в размере ячейки) определяют так же, как и в случае метода конечных деформаций. Результирующее значение интенсивности главных логарифмических деформаций e_i получают суммированием этапных значений ε_i .

$$e_i = \sum_1^n \varepsilon_i .$$

Поэтапные методы исследования конечных деформаций используют в случае, если отдельные этапы, на которые разбивают *немонотонный процесс формоизменения*, удовлетворяют (хотя бы приближенно) условиям монотонности.

С.И. Губкин описывал поэтапный метод изучения процесса, при котором на каждом этапе определяют главные деформации путем сопоставления осей эллипса с осями исходного круга. Причем после каждого этапа эллипсы удаляют и вновь наносят круговую сетку, центры ячеек которой должны совпадать с центрами удаленных эллипсов. В этом случае компоненты деформаций определяют с помощью известных уравнений теории малых упругопластических деформаций.

Погрешность этого метода очевидна, и он не нашел широкого применения.

К поэтапным методам относят *метод визиопластичности*, предложенный Е. Томсоном, в основе которого лежит положение о том, что вектор смещения за малый отрезок времени dt определяет вектор скорости данной материальной точки $V = u / dt$.

При этом компоненты скорости деформации:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{11} &= \frac{\varepsilon_{11}}{dt}; & \dot{\varepsilon}_{12} &= \frac{\varepsilon_{12}}{dt}; \\ \dot{\varepsilon}_{22} &= \frac{\varepsilon_{22}}{dt}; & \dot{\varepsilon}_{23} &= \frac{\varepsilon_{23}}{dt}; \end{aligned}$$

$$\dot{\varepsilon}_{33} = \frac{\varepsilon_{33}}{dt}; \quad \varepsilon_{31} = \frac{\varepsilon_{31}}{dt}.$$

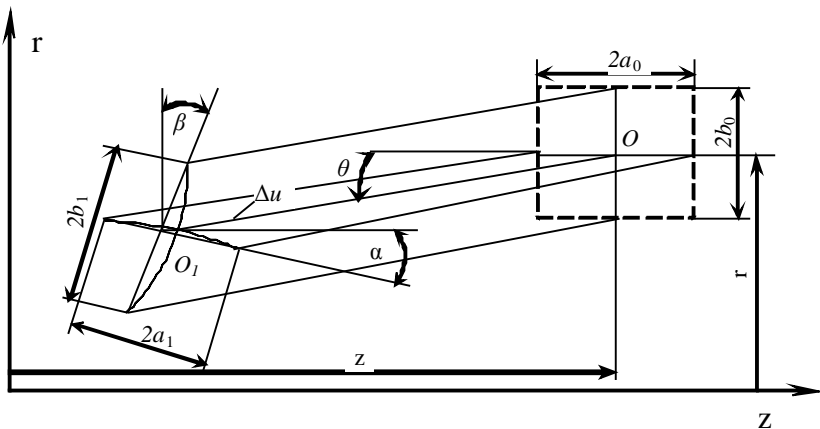
А сами компоненты малых деформаций определяют из уравнения Коши:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{du_{11}}{dx_1}; & \varepsilon_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{du_{22}}{dx_1} + \frac{du_{11}}{dx_2} \right); \\ \varepsilon_{22} &= \frac{du_{22}}{dx_2}; & \varepsilon_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{du_{33}}{dx_2} + \frac{du_{22}}{dx_3} \right); \\ \varepsilon_{33} &= \frac{du_{33}}{dx_3}; & \varepsilon_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{du_{11}}{dx_3} + \frac{du_{33}}{dx_1} \right). \end{aligned}$$

Следовательно, применяя метод визиопластичности, необходимо определить поле перемещений материальных точек и построить поле скоростей. Поле, на котором располагается сетка после каждого очередного приращения деформации, фотографируют и по смещению положения узлов сетки фиксируют смещение частиц металла.

При достаточно малой базе сетки и при малых смещениях компоненты деформации могут быть определены следующим образом:

$$\varepsilon_{11} = \frac{a_1 \cos \alpha - a_0}{a_0}; \quad \varepsilon_{11} = \frac{b_1 \cos \beta - b_0}{b_0}; \quad \varepsilon_{12} = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{2}.$$



Метод визиопластичности (то есть поэтапного деформирования) по сравнению с методом, основанным на деформационной теории (метод конечной деформации), имеет следующие недостатки:

- необходимость прерывания процесса деформации, что связано с изменением контактных условий;
- неизбежность при повторном нагружении известных отклонений взаиморасположения половинок образца;
- невысокая точность определения скорости деформации, обусловленная графическими и расчетными построениями.

Методы, базирующиеся на теории течения

Эти методы основаны на непрерывном наблюдении за изменением формы и размеров ячейки делительной сетки, которые рассматривают как непрерывные функции некоторого параметра, чаще всего времени (за параметр могут быть приняты и другие факторы, например, перемещение).

Значение степени деформации определяют интегрированием по принятому параметру

$$e_i = \int_0^t u_i dt,$$

где u_i – интенсивность скорости деформации.

Таким образом, рассмотренные методы отличаются способом обработки результатов искажения координатной (делительной) сетки.

Общим для всех направлений метода координатной сетки является допущение о том, что в пределах объема, ограниченного ячейкой, тело считается изотропным, а деформация однородной.

Полученные данные рассматривают как локальные. Точность определения такой локальной характеристики зависит от степени неоднородности деформации и должна увеличиваться с уменьшением размеров ячейки сетки. С другой стороны, точность результатов зависит от точности измерения размеров ячейки, которая падает с уменьшением ее линейных размеров.

Наиболее полно методика изучения пластической деформации на основе теории течения разработана И.П. Ренне.

Метод течения применяют в случае *немонотонного процесса деформации*. Делительную сетку наносят на плоскость симметрии так, чтобы ее продольные риски при стационарном течении совпали с линиями тока.

Деформация в направлении линий тока

$$\varepsilon_1 = \ln(a/a_0),$$

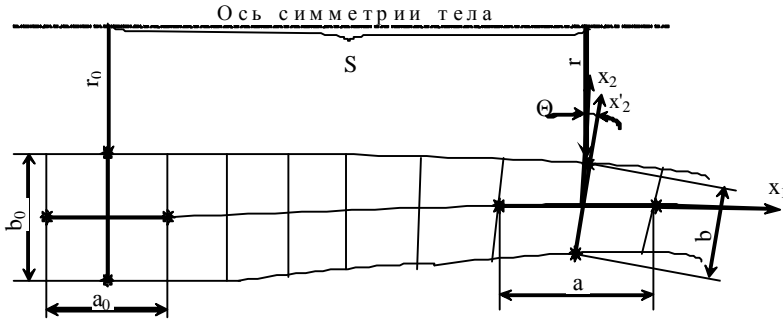
в тангенциальном направлении

$$\varepsilon_{\theta} = \ln(r/r_0),$$

где r , r_0 – начальное и текущее расстояние центра ячейки от оси симметрии течения;

в поперечном направлении

$$\varepsilon_2 = \ln(b/b_0).$$



Линейные компоненты тензора бесконечно малых деформаций находят дифференцированием по параметру S (вдоль линии тока).

$$d\varepsilon_1 = \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial S} dS; \quad d\varepsilon_{\theta} = \frac{\partial \varepsilon_{\theta}}{\partial S} dS.$$

Третий компонент в направлении x_2 (перпендикулярно линии тока) определяют из условия постоянства объема

$$d\varepsilon_2 = -d\varepsilon_1 - d\varepsilon_{\theta}.$$

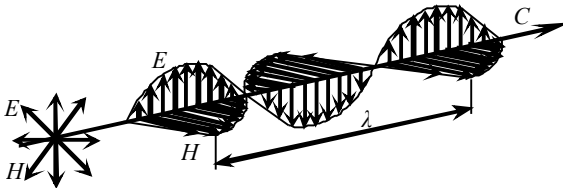
В качестве параметра для определения компонента приращения малых деформаций при исследовании пластического течения вместо пути S может быть взят порядковый номер ячейки или кадра при кинесъемке, путь деформирующего инструмента или время при заданном законе движения.

Следует отметить, что обработка экспериментальных данных, получаемых при помощи координатной сетки, довольно трудоемка, поэтому обычно осуществляют только анализ отдельных распределений деформаций по тому или иному направлению или рассматривают какой-либо локальный участок, что составляет малую долю информации, содержащейся в эксперименте.

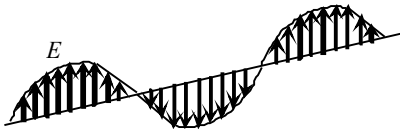
Поляризационно-оптический метод исследования напряжений и деформаций

В основе поляризационно-оптического метода лежат такие оптические явления, как поляризация света и эффект двойного лучепреломления.

Согласно электромагнитной теории световые волны представляют собой перемещение периодически меняющихся взаимно перпендикулярных векторов: электрического E и магнитного H . Оба вектора лежат в плоскости, перпендикулярной лучу, то есть распространение света есть распространение поперечных волн.



Распространение световых волн неполяризованного света



Распространение световых волн поляризованного света

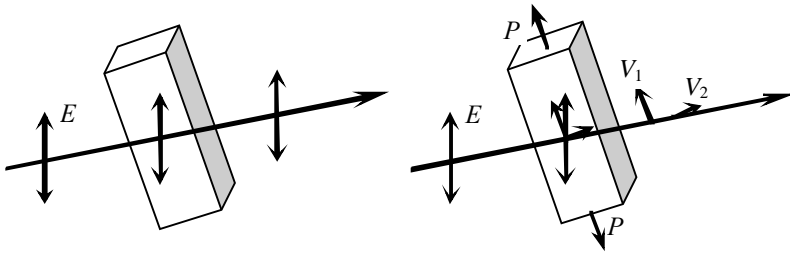
Если электрический вектор E совершает хаотические колебания, то получается естественный или неполяризованный свет.

Если электрический вектор колеблется только в одной плоскости, такой свет называют *плоскополяризованным*.

Обычно в поляризационных приборах для получения плоскополяризованного света используют поляроиды из исландского шпата или кальцита, пропускающих световые колебания только в одной плоскости. Источником поляризованного света являются также лазеры.

Второе явление, лежащее в основе поляризационно-оптического метода – искусственное двойное лучепреломление под воздействием внешних нагрузок. Этим свойством обладают все прозрачные материалы. Если прозрачный материал не нагружен, он изотропен к световой волне и пропускает ее в любом направлении.

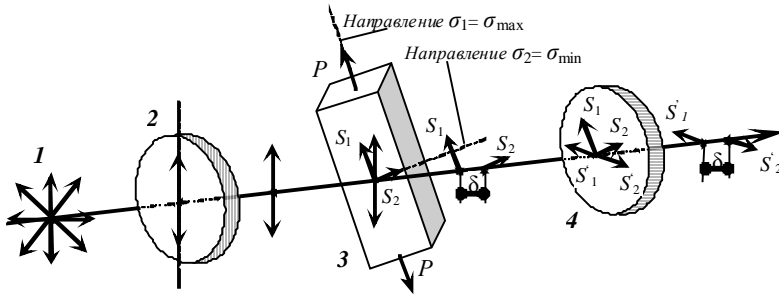
Под воздействием нагрузки прозрачный материал становится оптически анизотропным (его свойства в различных направлениях различны). В нем световая волна разлагается на две взаимно перпендикулярные волны с взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний, распространяющимися в материале с различными скоростями. Причем эти взаимно перпендикулярные плоскости поляризации совпадают с плоскостями главных напряжений.



Прохождение света через ненагруженную и нагруженную модели

Простейший полярископ состоит из источника света 1, поляризатора 2, прозрачной модели 3 и второго поляризатора (анализатора) 4.

Свет от источника 1, проходя через поляризатор 2, становится плоскополяризованным (обычно в вертикальной плоскости), проходит через прозрачную модель 3. Если модель не нагружена, плоскость поляризации света не нарушается, а если нагружена – то из-за явления двойного лучепреломления световая волна расщепляется на две с взаимно перпендикулярными направлениями (направления главных напряжений), которые распространяются с различными скоростями.



Если две световые волны S_1 и S_2 распространяются с различными скоростями, то после прохождения через модель они имеют разность хода δ , которому соответствует разность фаз этих волн

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} t(n_1 - n_2),$$

где λ – длина световой волны; t – толщина модели; n_1, n_2 – коэффициенты преломления света вдоль главных осей (направлений главных напряжений).

Существует связь между оптическими и механическими характеристиками прозрачного материала модели (то есть между скоро-

стями распространения света в теле и напряжениями в нем) в виде уравнений Неймана

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_0 + C_1\sigma_1 + C_2(\sigma_1 + \sigma_2) \\ V_2 &= V_0 + C_1\sigma_2 + C_2(\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \right\},$$

где V_1, V_2 – скорость света после деформации тела по направлениям главных напряжений соответственно; V_0 – скорость распространения света в теле в недеформированном состоянии; C_1, C_2 – оптико-механические константы материала и длины волны света соответственно.

Из уравнений Неймана с учетом зависимости для определения разности хода можно вывести основной закон фотоупругости, в котором линейно связаны оптический эффект и разность главных напряжений.

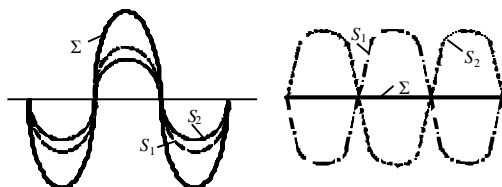
$$\delta = C_\sigma t (\sigma_1 - \sigma_2),$$

где C_σ – коэффициент оптической чувствительности по напряжениям; σ_1, σ_2 – главные напряжения в плоскости модели.

Далее два луча света S_1 и S_2 , имеющие разность хода, проходят через второй поляризатор (анализатор), плоскость поляризации которого перпендикулярна плоскости поляризации первого поляризатора (горизонтальная плоскость поляризации). После анализатора остается только часть интенсивности лучей (S'_1 и S'_2) (проекции на плоскость поляризации анализатора). Так как лучи S'_1 и S'_2 лежат в одной плоскости и имеют разность хода δ , они начинают интерферировать друг с другом. Если фазы этих волн совпадают, интенсивность света возрастает, если не совпадают – интенсивность света убывает и может исчезнуть совсем. Получается интерференционная картина. Одноцветные полосы называются *изохромами* и являются *геометрическим местом точек с одинаковой разностью главных напряжений (или главных деформаций)*.

Поляризационно-оптический метод имеет три основных направле-

ния в исследовании напряжений и деформаций, связанных с особенностями его использования при решении различных задач: метод фотоупругости, метод фотопластичности, метод оптически чувствительных покрытий.



Интерференция световых волн в анализаторе полярископа

Методом фотоупругости решают плоские и объемные задачи для изделий, работающих в упругой области. Для этих целей изготавливают прозрачные модели деталей из материалов на основе эпоксидных смол. Для упругих материалов достаточно знать цену изохроматической полосы, модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

Метод фотопластичности используют для решения задач пластического формоизменения металла под воздействием внешних нагрузок. К оптически чувствительным материалам, используемым в фотопластичности, предъявляется ряд специальных требований, зависящих от конкретных целей исследования. Эти требования более жесткие, чем для материалов, используемых в фотоупругости. Они сводятся к следующему:

- механическая и оптическая однородность;
- высокая пластичность;
- соответствие реологического поведения материала модели материалу натуре;
- наличие определенной связи между оптическим эффектом и напряжениями, деформациями, температурой и др.

Для изготовления фотопластических моделей используют целлюлоид, полистирол, поликарбонатную смолу и др.

Ответ на вопрос о том, насколько достоверно данные оптического метода описывают реальные процессы пластического формоизменения, может дать теория моделирования. Однако моделирование в теории пластичности является одной из наиболее важных и наименее решенных задач.

Вопросы моделирования и переноса результатов с модели на натуру автоматически отпадают при использовании *метода прозрачных, оптически чувствительных, слоев*, наклеиваемых на реальный пластически деформируемый металлический объект.

Сущность *метода оптически чувствительных покрытий (ОЧП)*, наносимых на поверхность исследуемого объекта, заключается в том, что оптически чувствительный слой копирует деформации поверхности объекта. Основой для изучения пластических деформаций является то обстоятельство, что вследствие большого различия модулей упругости металла и покрытий металл находится в пластической области, а материал покрытия – в упругой. Применяя основные законы фотоупругости, отнесенные к деформациям, можно определить составляющие деформированного состояния.

Формулировка основного закона оптически чувствительных покрытий имеет вид:

$$\delta = 2C_{\varepsilon} t_n (\varepsilon' - \varepsilon''),$$

где C_ε – коэффициент оптической чувствительности по деформациям; ε' , ε'' – главные деформации в плоскости покрытия; t_n – толщина покрытия.

Интерференционные картины в этом случае получают на *отражательных полярископах*.

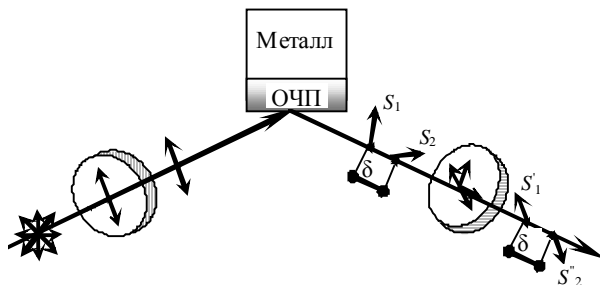


Схема отражательного полярископа

К достоинствам метода оптически чувствительных покрытий можно отнести:

- возможность исследования напряженно-деформированного состояния в упругой и пластической областях и прямого наблюдения за разрушением в процессе его развития;
- возможность проведения исследований на реальных конструкциях (мосты, станины) при обычных и повышенных (до 650°C) температурах, а также в местах, недоступных для человека, с использованием телеметрирования.

Однако этот метод имеет и недостатки:

- невозможность исследования напряжений и деформаций внутри детали;
- затрудненность точного определения компонент напряженного состояния в пластической области. Хотя некоторые материалы покрытий выдерживают значительные упругие деформации (до 60%).

Картины изохром несут в себе информацию о разности главных напряжений ($\sigma' - \sigma''$) или деформаций ($\varepsilon' - \varepsilon''$). Таким образом, при использовании метода ОЧП при обработке полученных данных задача сводится к разделению деформаций и определению напряжений.

Если и материал покрытия, и металл находятся в упругой области, то напряжения, действующие на металл, определяют по зависимостям:

$$\sigma' = \frac{E}{E_n (1 - \mu^2)} \left[(1 - \mu \mu_n^2) \sigma'_n - (\mu_n - \mu) \sigma''_n \right],$$

$$\sigma'' = \frac{E}{E_n(1-\mu^2)} \left[(1-\mu\mu_n^2)\sigma_n'' - (\mu_n - \mu)\sigma_n' \right],$$

где E , E_n – модули упругости деформируемого тела и покрытия;
 μ , μ_n – коэффициент Пуассона металла и покрытия.

Связь между напряжениями и деформациями в покрытии

$$(\sigma_1' - \sigma_2'')_n = \frac{E_n}{1 + \mu_n} (\varepsilon' - \varepsilon'')_n.$$

Если же тело находится в пластической области, то эти зависимости не могут быть использованы, так как на поверхности раздела «металл–покрытие» действуют неизвестные силы сцепления.

В этом случае разделение деформаций становится возможным при использовании дополнительных экспериментальных данных.

В частности, можно измерить поперечную деформацию в интересующей точке, то есть определить сумму деформаций.

$$\varepsilon' + \varepsilon'' = \frac{\omega}{\frac{\mu_n}{1-\mu_n}t_n + \frac{\mu}{1-\mu}t},$$

где ω – суммарная поперечная абсолютная деформация металла и покрытия; t , t_n – толщина соответственно металла и покрытия.

Другим способом разделения деформаций является наклонное просвечивание.

Сущность способа заключается в том, что когда луч света падает под углом α к нормали покрытия, то оптический эффект создается разностью напряжений $\sigma_n' - \sigma_n'' \cos^2 \alpha$, и разность хода в точке

$$\delta_{\alpha_1} = \frac{2t C_\sigma}{\cos \alpha} (\sigma_n' - \sigma_n'' \cos^2 \alpha).$$

При рассмотрении модели под различными углами за счет разности хода δ_{α_i} в интересующих точках будут компенсироваться нормально наблюдаемые изохроматические полосы. Таким образом, можно разделить деформации не только в точке, но и по полю.

Для разделения деформаций по данным метода *ОЧП* в качестве дополнительного эксперимента можно использовать метод муар, для чего достаточно получить значения одной из компонент деформации ε_1 или ε_2 .

Метод муаровых полос и его применение для определения напряжений и деформаций

При наложении двух или более сеток (растров), состоящих из линий, точек или иных геометрических элементов, возникает картина, состоящая из чередующихся темных и светлых полос. Это явление называется *муаровым эффектом*. Муаровая картина возникает, если эти два растра повернуты друг относительно друга на какую-либо величину или имеют незначительную разницу в шаге (расстояние между соседними одноименными светлыми или темными полосами).

Чем объясняется явление муара? Человеческий глаз имеет ограниченную разрешающую способность. Систему чередующихся темных и светлых полос, расстояние между которыми видно под углом зрения меньше 1Å , глаз воспринимает как сплошное серое поле. При наложении двух систем линий интенсивность света по поверхности изображения меняется, и это изменение интенсивности воспринимается в виде муаровой картины.

Центр светлой муаровой полосы совпадает с точкой *A*, где совпадают светлые линии обоих растров. Центр темной муаровой полосы совпадает с точкой *B*, где темная линия одного растра перекрывает светлую линию другого растра.

Таким образом, муаровый эффект есть *оптическое явление*,

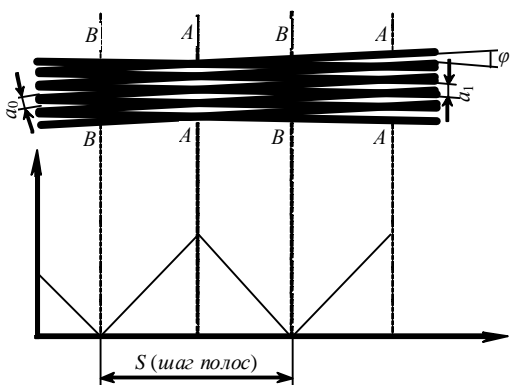
возникающее при наложении мелких сеток. Длина волны света в этом эффекте не имеет значения, поэтому муаровый эффект иногда называют механической интерференцией, по аналогии с обычной интерференцией света.

Интерференция – сложение двух периодических явлений, в результате которого возникает третье явление с более крупным периодом.

Муаровые полосы обладают свойством *увеличивать перемещения.*

Шаг муаровых полос

$$N = \frac{a_0 a_1}{\sqrt{a_0^2 + a_1^2 - 2a_0 a_1 \cos \varphi}},$$



где a_0, a_1 – шаг исходного и искаженного растров; φ – угол поворота между линиями растров.

Из анализа приведенного уравнения следует, что малым значениям разности шагов и угла поворота соответствует большая величина шага муаровых полос, то есть малым деформациям, вызывающим искажение растра, соответствуют большие параметры муаровой картины.

Определим величину относительной степени деформации ε при $\varphi = 0$, если известны шаг исходного растра a_0 и шаг муаровой полосы n .

$$N = \frac{a_0 a_1}{\sqrt{a_0^2 + a_1^2 - 2a_0 a_1}} \cdot \frac{a_0 a_1}{\sqrt{(a_1 - a_0)^2}} \cdot \frac{a_0 a_1}{a_1 - a_0}.$$

Откуда

$$a_1 = \frac{N a_0}{N - a_0}; \quad \varepsilon = \frac{a_1 - a_0}{a_0} = \frac{a_0}{N - a_0}.$$

Эффект муара был открыт лордом Реллеем в 1874 г., но только во второй половине XX века, когда появилась возможность получать достаточно мелкие и точные растры (до 100 линий на 1 мм), этот метод начали широко использовать в исследовательской практике.

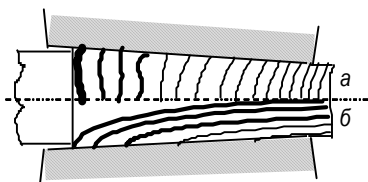
Муаровый эффект при исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) металла применяют в двух направлениях:

- для исследования НДС с помощью непосредственного нанесения растра на поверхность исследуемой модели;
- для исследования прогибов пластин и оболочек путем проектирования на них растров.

Исследование НДС при непосредственном нанесении растра на поверхность металла

Растр на исследуемую поверхность наносят царапаньем, травлением или способом фотопечати. Затем образец подвергают деформированию, в процессе которого растр также деформируется. Затем на продеформированный растр накладывают эталонный растр (такой, каким он был до деформации). В результате их интерференции получается муаровая картина.

Муаровые полосы в данном случае являются линиями равных перемещений частиц металла. То есть все частицы, лежащие на муаровой полосе, получили одинаковые перемещения, равные шагу исходного растра. Поэтому, подбирая исходный растр с нужным шагом, можно получать данные о деформации металла с необходимой степенью точности.



Муаровая картина очага деформации при волочении:

а – продольная деформация;

б – поперечная деформация

Так как муаровая картина несет информацию о перемещении частиц металла только в направлении, перпендикулярном линиям раstra, то для получения данных о деформации в исследуемой плоскости необходимо нанести еще один растр с направлением линий, перпендикулярным первому раstrу. Обычно если исследуют НДС в какой-либо плоскости сечения образца, то на

одну половину образца наносят растр с продольной линейатурой, а на другую – с поперечной; если исследуемая модель имеет ось симметрии, то на различные половинки сечения относительно оси симметрии наносят растры с взаимно перпендикулярным расположением линий.

Обозначив перемещение в направлении оси x_1 через U , а в направлении оси x_2 через V , деформации можно записать:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial U}{\partial x_1}; \quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial V}{\partial x_2}; \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial x_2} + \frac{\partial V}{\partial x_1} \right).$$

Принимая во внимание то, что муаровая полоса является линией равных перемещений, зная ее порядок и цену, перемещения в интересующих точках можно определить следующим образом:

$$U = ma_0; \quad V = na_0,$$

где n, m – порядковый номер муаровой полосы; a_0 – шаг исходного раstra.

Для определения знака деформации (сжатие или растяжение) используют одно из свойств муаровых полос, а именно, исходный растр, наложенный на исследуемую продеформированную поверхность, начинают вращать. Если муаровые полосы поворачиваются (смещаются) в сторону, противоположную направлению поворота недеформированного раstra, то образец был подвергнут деформации сжатия (деформация имеет отрицательный знак); если же направление поворота раstra совпадает с направлением смещения муаровых полос – имеет место деформация растяжения.

При определении деформации в точках, не лежащих на муаровых полосах, применяют метод интерполяции с допущением, что

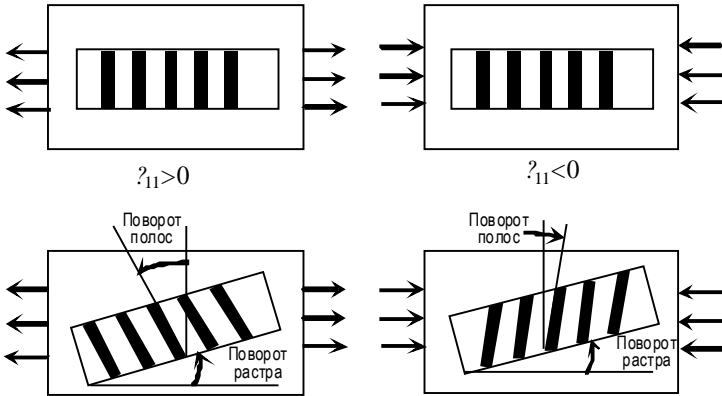
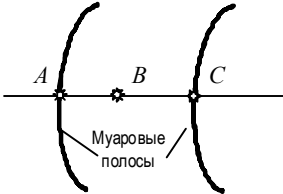


Схема определения знака деформации по муаровой картине

перемещение от линии к линии происходит по линейному закону. При этом перемещение в точке B

$$U_B = U_A + (U_C - U_A) \frac{AB}{AC}.$$



По найденным компонентам тензора деформации в точке можно вычислить интенсивность деформации

$$\epsilon_i \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{22}^2 + \epsilon_{11}\epsilon_{22} + \epsilon_{12}^2}.$$

Зная связь между интенсивностью деформации (ϵ_i) и интенсивностью напряжений (σ_i), определяют величину σ_i . После чего находят компоненты тензора напряжений.

При решении задачи для плоского напряженного состояния эти зависимости имеют вид:

$$\sigma_{11} = \frac{4}{3} \frac{\sigma_i}{\epsilon_i} \left(\epsilon_{11} + \frac{1}{2} \epsilon_{22} \right); \quad \sigma_{22} = \frac{4}{3} \frac{\sigma_i}{\epsilon_i} \left(\epsilon_{22} + \frac{1}{2} \epsilon_{11} \right); \quad \sigma_{12} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\epsilon_i} \epsilon_{12}.$$

В результате обработки муаровой картины перемещений можно получить поля частных производных линий равных деформаций, скоростей деформаций и др.

Таким образом, в зависимости от задачи исследования муаровая картина может дать большую и разнообразную информацию.

Исследование НДС тонкостенных конструкций, пластин и оболочек

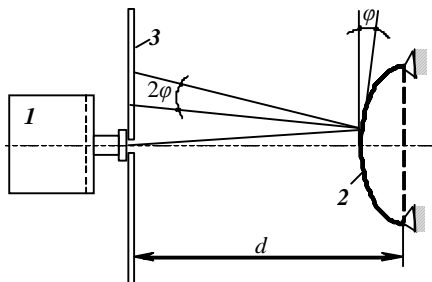
При исследовании изгибов оболочек применяют два способа исследования с помощью метода муаровых полос:

- с использованием отражения спроектированного растра (исследование изгиба на зеркальных моделях);
- с использованием теневого изображения проектируемого растра (на поверхностях, не имеющих зеркальной поверхности).

Сущность первого способа получения муаровых картин заключается в том, что перед экраном 3, на котором изображен растр, устанавливают зеркальную пластину 2 и через отверстие в экране фотокамерой 1 производят фиксирование изображения растра на поверхности недеформированной пластины.

Затем модель нагружают и еще раз фотографируют изображение растра, но уже на поверхности деформированной модели.

Углы наклона искривленной поверхности деформированной модели $\partial\varphi/\partial x$ при этом вызывают смещение линий отраженного



Получение зеркальной муаровой картины

изображения растра на угол $2\partial\varphi/\partial x$. Наложения отраженного растра до и после нагружения образуют картину муаровых полос, которые являются линиями уровня постоянных углов поворота нормали к исследуемой поверхности. Зная через углы наклона нормали кривизну поверхности, можно рассчитать напряжения, действующие в пластине.

К недостаткам этого способа следует отнести:

- необходимость двойного фотографирования отраженного растра, так как визуально зафиксировать муаровую картину невозможно;
- специальная подготовка зеркальной поверхности исследуемого объекта.

Муаровая картина, характеризующая величину прогиба поверхности, может быть получена и другим способом – с использованием теневого изображения проектируемого растра.

Для получения теневой муаровой картины полупрозрачный растр 1 (выполненный на стекле или изготовленный из натянутых нитей) располагают на достаточно близком расстоянии над исследуемой поверхностью.

дуемой моделью 2. При наклонном освещении (источник света 3) в направлении, перпендикулярном его линиям, на поверхности модели образуется теневое изображение раstra. Наблюдая растр и его тень в направлении, перпендикулярном к плоскости раstra (или под некоторым углом к нему β), можно видеть картину муаровых полос как результат интерференции исходного и теневого растров. Эту картину можно фотографировать и наблюдать визуально.

Величина прогиба для точек муаровой полосы

$$\omega = ma(\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \alpha),$$

где m – порядковый номер муаровой полосы; a – шаг исходного раstra; α , β – углы (см. рисунок).

Таким образом, в данном случае муаровая полоса – геометрическое место точек одинакового расстояния от плоскости исходного раstra до исследуемой поверхности.

Преимущества метода муар:

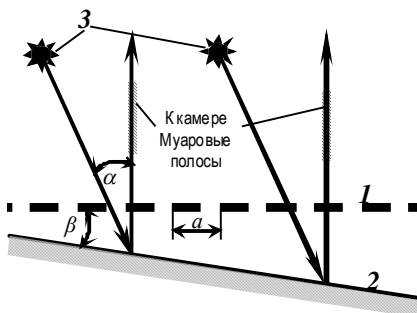
- исследование на реальных материалах;
- высокая степень точности в определении деформаций;
- метод позволяет получить интегральную картину деформируемого состояния по всему исследуемому объему;
- возможность исследования деформаций независимо от их физической природы при статическом и динамическом нагружениях.

К недостаткам этого метода можно отнести следующее:

- невозможность исследования больших пластических деформаций (более 50%) и малых упругих деформаций (менее 1%);
- сложность получения мелких растров (менее 20 линий на 1 мм).

Определение напряженно-деформированного состояния испытанием твердости

Широко известны факты, когда затраченная на пластическое формоизменение металла работа приводит к существенным изменениям физико-механических свойств металла. В частности, благодаря упрочнению, вызванному пластической деформацией, изменению подвержен такой показатель, как твердость.



Получение теневой муаровой картины

Следовательно, если выявить функциональную связь между величиной твердости в интересующей нас зоне и степенью деформации в этой же зоне, то по замерам твердости можно судить о стадии напряженно-деформированного состояния металла.

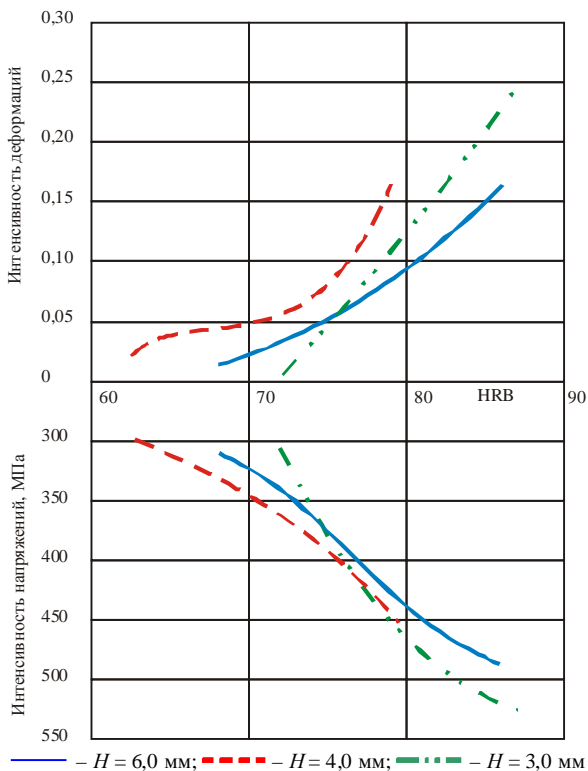
Согласно теории Г.Д. Деля распределение твердости однозначно определяет распределение напряжений и деформаций в образцах *из стали конкретной марки* независимо от схемы напряженного состояния.

Метод основан на изменении показателя твердости металла вследствие его пластической деформации. При выявлении зависимости между твердостью и интенсивностями напряжений и деформаций твердость определяют стандартными методами. Путем испытания образцов *из исследуемого материала* на растяжение и параллельных замеров твердости строят *тарировочный график*, связывающий интенсивность напряжений, твердость и интенсивность деформаций.

Г.Д. Дель рекомендует для определения значений твердости использовать метод Виккерса. Однако в тех случаях, когда на стабильность результатов практически не влияет упрочнение металла, вызванное вдавливанием индентора (площадь, на которой измеряют твердость, не ограничена), можно использовать и другие методы (Роквелла или Бринелля). Для этого при испытании на растяжение замеры твердости производят не на одном образце, который обычно деформируют ступенчато с промежуточными разгрузками и измерением твердости (по методике Г.Д. Деля), а на серии из пяти – десяти образцов, отобранных от одной заготовки. Первый образец деформируют до разрыва с записью условной диаграммы растяжения. Нагружение остальных образцов осуществляют в диапазоне равномерного растяжения с определенным шагом. В процессе нагружения ЭВМ испытательного комплекса фиксирует условные и истинные напряжения и деформации. После растяжения каждого образца в трех точках замеряют твердость по Роквеллу и определяют среднее значение.

Измеряя затем твердость в различных зонах деформированного тела из данного исследованного материала, по тарировочному графику, являющемуся характеристикой материала, определяют распределение интенсивностей напряжений и, исходя из гипотезы о единой кривой течения металла, – соответствующее распределение интенсивностей деформаций.

Связи между *твердостью и интенсивностями напряжений и деформаций* могут быть представлены в виде регрессионных зависимостей. Правильность выбранных уравнений проверяют анализом оценки дисперсий по критерию Фишера при соответствующих степенях свободы.



Тарировочный график для стали марки Ст3Гпс

Регрессионные уравнения зависимости интенсивностей напряжений
и деформации от твердости

Марка стали	Уравнение регрессии	R^2 *)
Ст3Гпс	$\sigma_i = 29157 \varepsilon_i^3 - 15715 \varepsilon_i^2 + 28625,5 \varepsilon_i + 197,09$	0,9988
	$\sigma_i = -0,0216(HRB)^3 + 4,6327(HRB)^2 - 323,17(HRB) + 7658,3$	0,9932
	$\varepsilon_i = 0,0001(HRB)^2 - 0,0027(HRB) - 0,4151$	0,9794
Ст3пс	$\sigma_i = 30643 \varepsilon_i^3 - 15852 \varepsilon_i^2 + 3225,2 \varepsilon_i + 281,49$	0,9947
	$\sigma_i = -1,2055(HRB)^2 + 216,86(HRB) - 9193,8$	0,9365
	$\varepsilon_i = 0,000243(HRB)^2 - 0,024765(HRB) + 0,4927$	0,9777
Ст3сп	$\sigma_i = 45858 \varepsilon_i^3 - 21467 \varepsilon_i^2 + 3895,9 \varepsilon_i + 305,2$	0,9961
	$\sigma_i = -0,7762(HRB)^2 + 151,6(HRB) - 6776,1$	0,9828
	$\varepsilon_i = 0,000662(HRB)^2 - 0,099701(HRB) + 3,7619$	0,9970

*) R^2 – достоверность аппроксимации.

Известны методики определения компонентов тензора напряжений. Например, для определения главных напряжений при плоском напряженном состоянии по определенной твердости и поперечной деформации ε_3 можно использовать зависимость

$$\sigma_1(\sigma_2) = \sigma_i \left[-\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_i} \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_i} \right)^2} \right].$$

Достоинствами этого метода являются:

- простота исследования;
- возможность исследования напряженно-деформированного состояния в объеме металла, не прибегая к предварительному его рассечению, что приводит к заведомым погрешностям. В этом случае образец после деформирования сошлифовывают на определенную величину и замеряют твердость. Погрешность определения твердости от операции сошлифовки крайне незначительна;
- возможность определения напряженно-деформированного состояния на натуральных объектах, подвергшихся разрушению или работающих в определенных условиях, и таким образом установления причин разрушения или условий работы агрегата (детали).

Микроструктурный метод исследования конечных пластических деформаций металла

Метод впервые предложен Г.А. Смирновым-Аляевым. Его используют для исследования зон концентрации напряжений, зон возможного появления трещин, зон выраженной немонотонности протекания процессов и др.

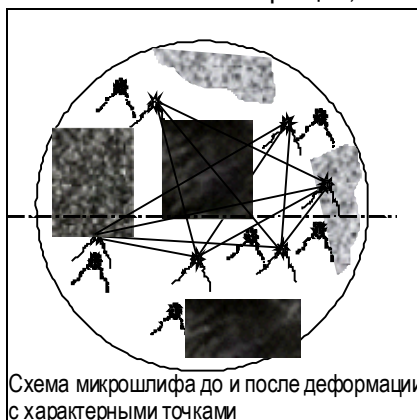


Схема микршлифа до и после деформации с характерными точками

Метод заключается в следующем. На исходной недеформированной детали интересующую нас зону помечают каким-либо знаком (репером). В этом месте делают микршлиф, который фотографируют. Измеряют расстояния между рядом характерных точек на очертаниях зерен. Замеряют величины этих отрезков ρ_0 и углы θ_0 , которые они составляют с какими-либо выбранными направлениями.

После деформации вновь осуществляют съемку и замер измененных в процессе деформации длин ρ и углов θ . В дальнейшем эти данные обрабатывают.

Недостатки метода:

- необходимость фиксирования исходных точек и изготовления микрошлифов;
- трудоемкость расчета;
- возможность использования только на свободных поверхностях деформируемого тела.

Тензометрический метод в исследовании напряженно-деформированного состояния

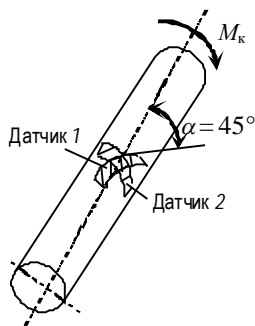
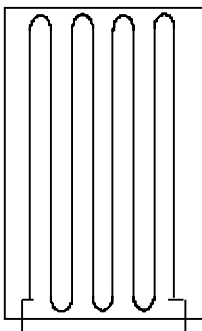
Для определения величин, связанных с деформацией детали или образца, можно использовать достаточно точные, простые и удобные в эксплуатации *фольговые или проволочные датчики сопротивления*.

Основой проволочного датчика служит зигзагообразно уложенная проволока, удельное сопротивление которой при ее деформации изменяется и регистрируется осциллографом.

Такой датчик наклеивают продольной осью вдоль главной оси измеряемых напряжений в исследуемой детали и он воспринимает деформацию этой детали. (Для определения крутящих моментов датчики наклеивают под углом 45° относительно продольной оси детали.)

Перед началом проведения эксперимента датчики тарируют, то есть определяют зависимость изменения сопротивления от степени деформации, для чего нагружают образец усилием с известной величиной.

Датчики наклеивают на исследуемую поверхность в интересующих нас точках и присоединяют к осциллографу, который фиксирует изменение их сопротивления в процессе деформации. Затем величину сопротивления датчиков в различные моменты деформации по



тарировочному графику переводят в деформации ε_1 , ε_2 и по ним рассчитывают напряжения.

Этот метод может быть использован для исследования как упругих, так и пластических деформаций.

Применение голографии в исследовании деформаций

Голография – это способ регистрации и последующего восстановления волн. Волны могут быть любые – световые, рентгеновские, акустические и др. Этот способ изобрел Денис Габер в 1948 г. Физическая основа голографии – учение о волнах, их интерференции и дифракции.

Голограмму записывают на фотопластинке как результат интерференции опорной и предметной волн. Последняя несет информацию об исследуемом объекте. В качестве источника света используют лазер. Пучок света от лазера, проходя через расширитель пучков, расщепляется на два. В результате того, что волны (предметная – от объекта и опорная – от зеркала) приходят к фотопластинке в разное время, они интерферируют между собой, результат интерференции записывают. Далее фотопластинку проявляют.

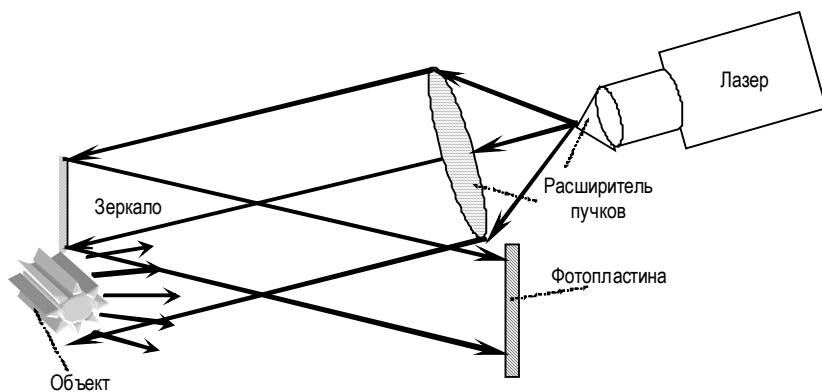


Схема установки для получения голограммы

Если теперь убрать объект (предмет), а экспонированную пластинку осветить только опорной волной, то в результате дифракции света восстанавливается предметная волна, то есть можно видеть объемное изображение предмета, как будто он и не был убран. Причем этот мнимый предмет настолько реален, что, меняя положение головы, можно рассматривать ближние и дальние его части. Если же предмет не убирать, то можно наблюдать две волны: идущую от предмета и восстановленную от голограммы. Если предмет получил деформацию, то эти две волны (от предмета и восстановленная предметная волна) начинают интерферировать. В этом случае получается изображение предмета, перерезанное интерференционными полосами – *линиями равных разностей хода волн* (подобие муаро-

вых полос). Таким способом можно определить *деформации* очень малых величин, сравнимых с длиной волны света.

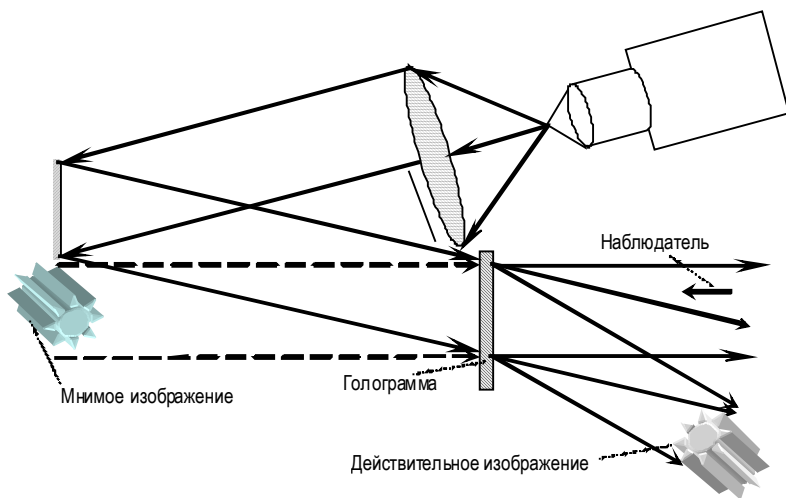
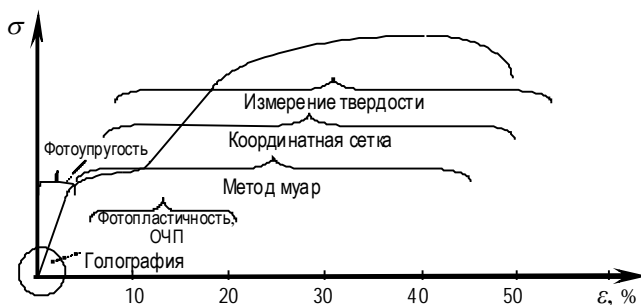


Схема восстановления волнового фронта

Необходимо отметить, что из рассмотренных основных методов экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния металла в процессах обработки металлов давлением нельзя рекомендовать какой-либо один метод.



Область применения экспериментальных методов исследования НДС металла

На современном уровне экспериментальных исследований достоверную информацию в полном объеме можно получить лишь при совместном применении нескольких экспериментальных методов, то есть различные методы исследования напряжений и деформаций не столько подменяют, сколько дополняют и уточняют друг друга.

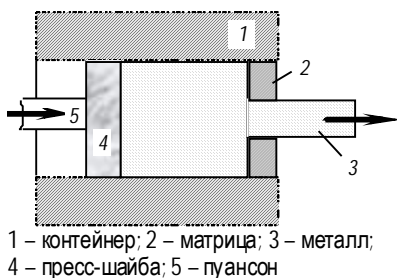
Раздел 7. ПРЕССОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ

При прессовании металл, заключенный в приемнике-контейнере, выдавливается через отверстие в матрице и получает форму поперечного сечения, соответствующую форме матричного отверстия.

Прессование называют также *экструдированием*.

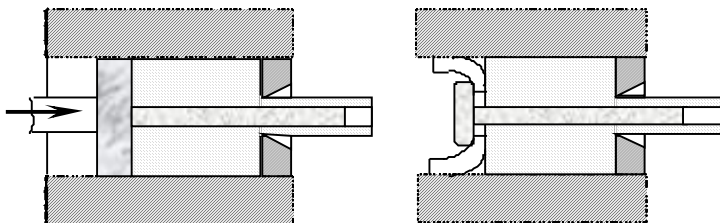
Различают два основных вида прессования: с *прямым* истечением металла и *обратным*.

Прессование с прямым истечением – пуансон перемещается относительно стенок контейнера при отсутствии перемещения матрицы (направление движения пуансона, пресс-шайбы и металла совпадают).

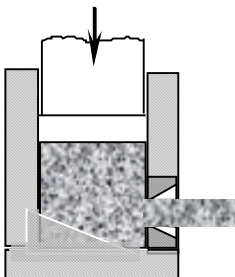


1 – контейнер; 2 – матрица; 3 – металл;
4 – пресс-шайба; 5 – пуансон

Применяют при прессовании сплошных и полых профилей. При этом можно получать конусное отверстие, переменное сечение стенки и др. При прессовании полых профилей заготовку либо вначале протыкают иглой, либо используют «язычковую» матрицу.



В «язычковую» матрицу вмонтирован рассекатель, который заканчивается язычком-иглой. Прессуемый металл рассекается на два потока. В обжимаемой зоне происходит сварка разделенных частей полого профиля.

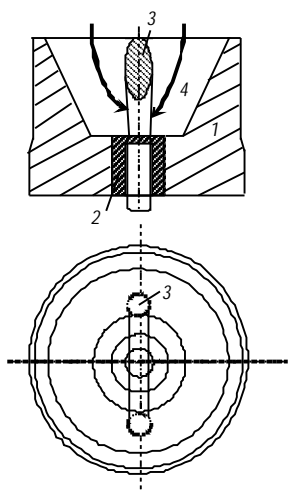
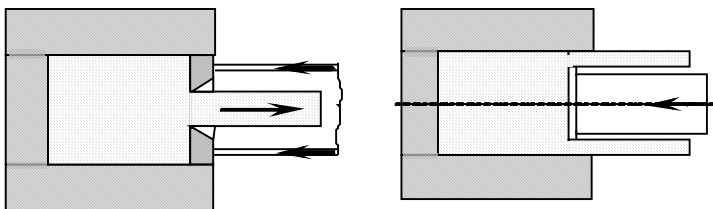


Разновидностью прессования с прямым истечением металла является *прессование с боковым истечением*.

Его преимущества:

- экономия габаритов установки;
- получение механических свойств готового изделия с минимальной разницей в поперечном и продольном направлениях;
- получение изделий максимальной возможной длины.

При прессовании с *обратным истечением* заготовка относительно стенок контейнера не перемещается за исключением небольшого объема вблизи матрицы. Поэтому влияние трения на усилие прессования и течение металла в этом процессе значительно меньше.



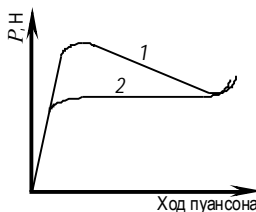
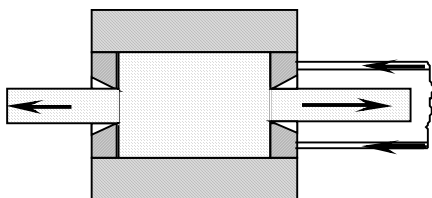
Язычковая матрица:
 1 – матрицедержатель;
 2 – матрица; 3 – рассекатель;
 4 – каналы, по которым движется металл в два потока

Иногда применяют совмещенное прессование, где прямое и обратное истечение металла происходят одновременно (например, используется при прессовании труб большого диаметра – $D \geq 100$ мм).

Основная схема напряженного состояния при прессовании – всестороннее неравномерное сжатие; схема деформированного состояния – одна деформация увеличения размеров (удлинения) и две – уменьшения размеров.

По сравнению с ковкой, прокаткой и волочением прессование обладает следующими *преимуществами*:

- механическая схема деформации – всестороннее сжатие с одной деформацией растяжения – обеспечивает наибольшую пластичность деформируемого металла. Поэтому прессованию можно подвергать малопластичные металлы, которые



1 – прямое прессование;
 2 – обратное прессование

деформировать другими средствами невозможно;

- возможность получения сплошных и полых профилей очень сложной конфигурации. Размеры и форму поперечного сечения можно менять по длине профиля плавно или ступенчато;
- при прессовании легко осуществляется переход с одного профиля на другой простой заменой матрицы. Поэтому прессование целесообразно применять при мелкосерийном производстве;
- обеспечивается высокая точность размеров сечения по сравнению с горячей прокаткой, так как упругие деформации инструмента ничтожно малы.

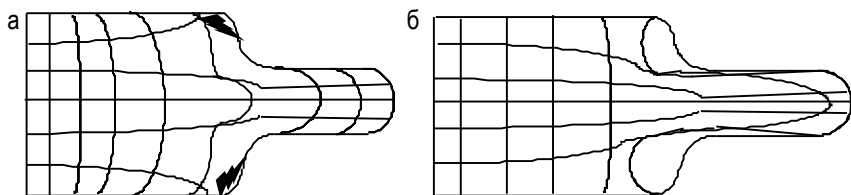
Недостатки процесса прессования:

- механическая схема деформации требует повышенного усилия деформации – тяжелые условия работы для матриц, игл, оснастки (частая смена, изготавливаются из специальных марок стали и сплавов);
- процесс характеризуется значительной неравномерностью свойств по сечению и длине в результате неравномерности деформации (больше, чем при прокатке);
- повышенный расход металла по сравнению с прокаткой из-за невозможности вести процесс прессования до конца.

Все это ограничивает применение процесса прессования:

- либо цветные металлы и сплавы с низким сопротивлением деформации;
- либо труднодеформируемые металлы и сплавы.

О неравномерности деформации при прессовании можно судить по искажению координатной сетки.



Искажение координатной сетки при:

а – прямом истечении металла; б – обратном истечении металла

Изгибы линий координатной сетки свидетельствуют о значительной неравномерности деформации, увеличивающейся от центра к периферии и от переднего конца к заднему.

Вблизи матрицы в углах образуются «мертвые» зоны (закрашены черным цветом), в которых металл не деформируется пластически.

Они имеют положительное значение, так как в них задерживаются все поверхностные дефекты слитка, накапливаются и не переходят в готовый профиль.

Факторы, влияющие на неравномерность деформации

Неравномерность деформации обуславливает неоднородность структуры и свойств изделий по сечению и длине.

Степень неравномерности деформации, а следовательно, и свойства изделий, зависят от следующих факторов:

- температуры металла и инструмента;
- трения на контакте металла с инструментом;
- степени деформации;
- скорости деформации;
- формы канала матрицы.

Температура металла и инструмента

Обычно для уменьшения усилия прессования металл перед прессованием нагревают. При соприкосновении металла с инструментом происходит значительное охлаждение его поверхности. Перепад температуры по сечению приводит к неоднородности механических свойств, различной деформируемости и появлению дополнительных внутренних напряжений: сжатия в центральных областях и растяжения в наружных слоях. Последние могут привести к поперечным кольцевым разрывам.

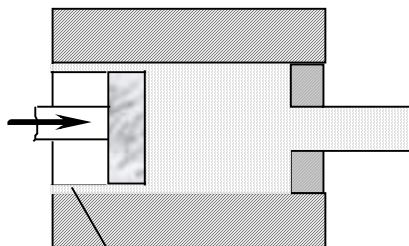
По длине прутка температура также неравномерна: задний конец имеет пониженную температуру. В связи с этим заготовку следует нагревать неравномерно: наружные слои и задний конец – до более высокой температуры. Матрицу и контейнер следует подогреть до температур 200–350°C.

Трение на контакте металла с инструментом

Трение также обуславливает неравномерную деформацию.

Для снижения трения применяют смазку, которая должна иметь низкую теплопроводность, чтобы уменьшить охлаждение металла. Чаще всего применяют стекло в форме порошка, волокон или тканей. Смазка уменьшает трение, снижает неравномерность деформации и усилие прессования.

Но наряду с этим вызывает уменьшение «мертвых», упругих



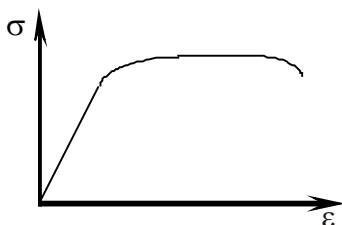
«Рубашка»

зон в матрице, где задерживаются все поверхностные дефекты слитка, которые переходят на готовое изделие. Поэтому для получения изделий с повышенными требованиями по поверхности прессование осуществляют либо без смазки, либо с «рубашкой»: диаметр пресс-шайбы делают на 2–3 мм меньше внутреннего диаметра контейнера. В «рубашке» задерживаются все поверхностные дефекты слитка.

Степень деформации

Повышенная степень деформации приводит к росту дополнительных сдвигов и, тем самым, к неравномерности деформации.

Однако при больших степенях деформации ее неравномерность будет снижаться вследствие уменьшения интенсивности упрочнения.



$$\mu = \frac{F_{\text{нач}}}{F_{\text{конеч}}}; \quad \delta = \ln \frac{F_{\text{нач}}}{F_{\text{конеч}}}$$

Поэтому для получения изделий с равномерными свойствами прессование осуществляют с большими степенями деформации (коэффициент вытяжки $\mu \geq 10$). Если изделие в дальнейшем еще будет подвергаться обработке давлением, то $\mu \geq 5$.

Скорость деформации

Скорость прессования определяет длительность контакта металла с инструментом. С точки зрения охлаждения металла скорость V должна быть возможно большей (чем больше скорость, тем равномернее деформация). Однако при повышении скорости прессования увеличиваются сопротивление деформации металла и потребляемое усилие.

При прессовании различают скорость прессования (скорость хода пуансона) $V_{\text{пресс}}$ и скорость истечения металла (скорость выхода прутка) $V_{\text{истеч}}$.

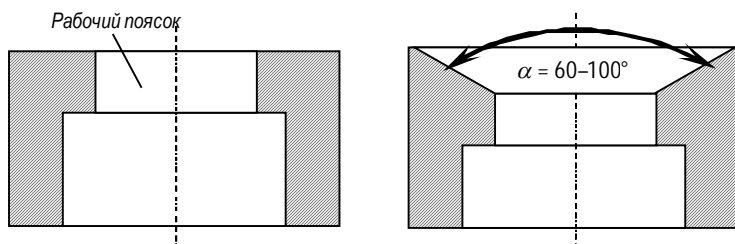
$$V_{\text{истеч}} = \mu V_{\text{пресс}}$$

Обычно для цветных металлов $V_{\text{пресс}} = 0,0002\text{--}0,5$ м/с; $V_{\text{истеч}} = 0,0007\text{--}25$ м/с в существующем диапазоне вытяжек.

Например, для меди при	$\mu < 40$	$V_{\text{ист}} = 120 \text{ см/с};$
	$40 < \mu \leq 100$	$V_{\text{ист}} = 500 \text{ см/с};$
	$\mu > 100$	$V_{\text{ист}} = 2500 \text{ см/с}.$
Труднодеформируемая сталь:	$\mu = 50\text{--}100$	$V_{\text{ист}} = 600\text{--}800 \text{ м/с};$
		$V_{\text{пресс}} = 40 \text{ см/с}.$
Магний		$V_{\text{ист}} = 1,5\text{--}5 \text{ см/с}.$
Алюминий: при прессовании	$\mu > 1000;$	
при прокатке	$\mu < 2.$	
Отходы при прессовании составляют 10–15%, при прокатке – 1–3%.		

Форма канала матрицы

Наибольшая неравномерность деформации достигается в плоских матрицах (цилиндрических). Уменьшение угла приводит к увеличению длины контакта, росту сил трения и, следовательно, к увеличению неравномерности деформации. Оптимальным углом матрицы, при котором усилие прессования и неравномерность деформации минимальны, является угол $\alpha = 60\text{--}100^\circ$.



Однако в тех случаях, когда требуется получить очень чистую поверхность изделия, применяют плоские матрицы, при наличии которых образуются большие «мертвые» зоны, задерживающие выход дефектов в изделие.

Длина рабочего (калибрующего) пояса типовой матрицы обычно составляет 5–8 мм. За рабочим пояском размер матрицы увеличивают, чтобы облегчить выход изделия из матрицы.

Матрицы и контейнеры работают в тяжелых условиях: температурный интервал для цветных металлов и сплавов составляет $500\text{--}900^\circ\text{C}$, для стали – $1000\text{--}1250^\circ\text{C}$. Давление достигает 1500 Н/мм^2 . Кроме того, рабочий пояс должен обладать высокой износостойкостью.

Матрицы изготавливают из легированных марок стали: 5ХНВ, ЭИ617, а также из победита ВК8, терморунода ТК1324 и др. Стоимость прессового инструмента составляет 15% от стоимости всего прессового оборудования.

Для определения усилия прессования с «рубашкой» можно использовать формулу Е.П. Унксова

$$P = F_0 \sigma_T \left(\frac{2L}{D} + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{F_0}{F_1} + \frac{4fl}{d} \right),$$

где F_0, F_1 – площадь поперечного сечения соответственно заготовки и готового изделия, мм²; σ_T – предел текучести деформируемого металла при температуре прессования, Н/мм²; f – коэффициент трения; L – длина заготовки, мм; D – диаметр заготовки, мм; d – диаметр цилиндрической части очка матрицы (рабочего пояса), мм; α – угол при вершине конуса матрицы, рад.; l – длина цилиндрической части очка матрицы (рабочего пояса), мм.

В заключительной части процесса прессования, когда прессшайба подходит к упругим зонам и объем металла резко сокращается, скорость скольжения металла увеличивается от периферии к центру. Это вызывает переход металла с боковой поверхности заготовки на торец, изгиб продольных волокон и образование воронки в центральной части торца («прессутяжины»), в которой сосредоточены поверхностные дефекты заготовки.

Чтобы в изделие не попадали прессутяжины с дефектами, прессование осуществляют не до конца – оставляют прессостаток, который потом обрезают.

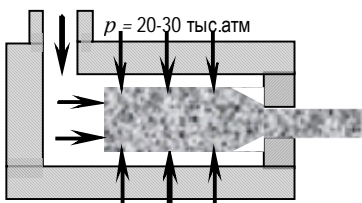
Прессование с «рубашкой» уменьшает прессутяжину и прессостаток.

Для прессования чаще всего применяют *гидравлические прессы горизонтальные* с усилием прессования 6000–600000 кН и *вертикальные* с усилием прессования 3000–10000 кН.

Гидроэкструзия

Гидроэкструзия – это процесс гидропрессования с прямым истечением металла, заключается в том, что металл из контейнера выдавливается через отверстие матрицы не пуансоном, а действием жидкости, подаваемой в контейнер под высоким давлением (20–30 тыс. атм.).

Металл в этом случае изолируется от инструмента жидкостью, движущейся в направлении истечения металла, вследствие чего трение металла об инструмент заменяется трением о жидкость. Так как жидкость



течет в одну сторону с металлом, усилие прессования уменьшается. Однако при большой вязкости жидкости и большой скорости ее истечения жидкость будет тянуть металл, вызывая в нем растягивающие напряжения, которые могут привести к разрушению заготовки. Поэтому необходимо, чтобы *жидкость вытекала с той же скоростью, что и металл*. При этом *жидкость не должна терять своих свойств*. Для каждого металла существует своя жидкость с определенной вязкостью, которая должна вытекать с определенной скоростью с тем, чтобы не ухудшать пластические свойства деформируемого металла. Наиболее удачными являются *глицерин* и *этиленгликоль*. Так как жидкость влияет на свойства металла, его перед гидропрессованием покрывают медью.

Так как контейнеры и уплотнения подвергаются высокому давлению, они выдерживают только одну прессовку. Контейнеры при этом армируют проволокой.

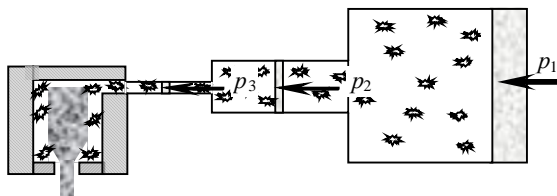
Преимущества процесса гидроэкструзии:

- позволяет деформировать очень твердые и хрупкие материалы, которые под воздействием схемы всестороннего сжатия и *отсутствия неравномерности деформации* хорошо деформируются;
- в некоторых металлах (молибден) после такой обработки (деформация свыше 50%) возрастают пластические и прочностные свойства. Молибден можно сворачивать в спираль, хотя он очень хрупок. Это объясняется тем, что при гидроэкструзии дислокационные трещины не только не раскрываются, а даже залечиваются;
- возможность получения вакуумно-плотных металлов. Обычная холоднокатаная медь пропускает кислород, азот, и др. Гидроэкструдированная медь – вакуумно-плотная. Применяется в космических установках, в вакуумных устройствах и др.

Технология получения таких материалов:

электронно-лучевая плавка + холодная гидроэкструзия.

Процесс гидроэкструзии очень дорог. Рабочее давление создают либо взрывом, либо *многоступенчатой гидравлической силой на обычных прессах*.



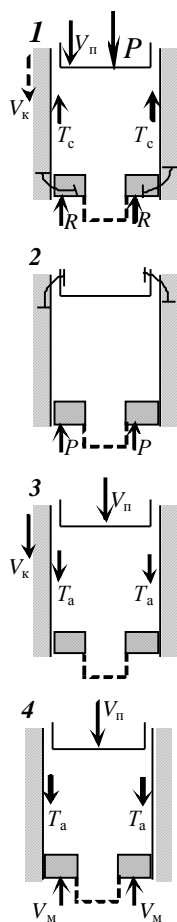
Прессование с активными силами трения

Силы трения могут быть активными (T_a) и сопротивляющимися (T_c), активная сила трения может быть реализована полностью или частично. V – скорость движения.



Полезными могут быть и активные силы трения, и силы трения сопротивления.

Схемы прессования



1. Прямое прессование характеризуется силой трения сопротивления.

2. Если $V_{контейн} = V_{пуанс}$, то $T_c = 0$ – приходим к процессу обратного прессования. При этом металл не перемещается, силы трения отсутствуют. Движением инструмента (матрицы) вдавливаются только близлежащий металл.

3. Если приводить в движение только контейнер, то силу трения можно уменьшить, устранить, а при условии $V_{контейн} > V_{пуанс}$ – сделать силу трения активной ($V_{контейн}/V_{пуанс} > 1$). Получаем процесс прессования с активными силами трения, которые помогают проталкивать металл через матрицу. Но для этого необходимо иметь пресс двукратного действия.

4. Аналогичного результата можно достичь, если привести в движение матрицу и пуансон: $V_{матрицы} > V_{пуанс}$. Здесь может быть использован обычный пресс однократного действия.

Для каждого металла имеется своя скорость истечения (наличие сил трения приводит к неравномерности деформации).

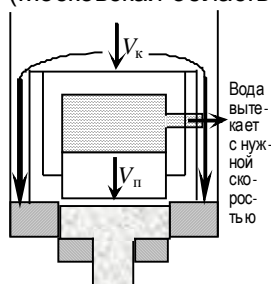
Теоретически по предложенным схемам прессования скорость истечения металла можно увеличить в 10–12 раз. Но при этом будет иметь место неравномерность деформации.

С точки зрения уменьшения неравномерности деформации и снижения усилия прессования для процесса с активными силами трения оптимальным является соотношение $V_{матрицы} / V_{пуанс} \sim 1,6$.

Преимущества процесса прессования с активными силами трения:

- уменьшается усилие прессования;
- исчезает прессутяжка, что позволяет не только вести процесс до конца (без прессостатка), но и осуществлять прессование слитка за слитком – экономия металла и повышение производительности;
- смазка не только не нужна, она мешает, так как силы трения активные.

Такой пресс работает на авиационном заводе в Стульпино (Московская область).



Силы трения можно регулировать по ходу прессования, то есть управлять процессом пластической деформации, что значительно расширяет возможности процесса.

Электронно-лучевая плавка – плавка в высоковакуумной печи для получения особо чистой стали и тугоплавких материалов, в которой нагрев основан на превращении кинетической энергии ускоренных в электростатическом поле электронов в тепловую при их ударе о поверхность нагреваемого объекта. В качестве источника электронов используют

электронные пушки, вакуум составляет 10 мПа–10 мкПа.

Гликоли – спирты, содержащие в молекуле 2 гидроксильные группы у насыщенных атомов углерода.

Этиленгликоль – $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ – сиропообразная бесцветная жидкость сладкого вкуса. Температура кипения 197,6°C. Используют в производстве пластификаторов, полиэфирных смол.

Заключительная лекция.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОМД КАК САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ ВИД ИССЛЕДОВАНИЯ

Классификация (классифицирование) – самостоятельный вид исследования – разделение какого-либо множества на подмножества, классы, обладающие совокупностью некоторых признаков.

В металлообрабатывающей отрасли применяются различные процессы обработки металлов давлением: прокатка, прессование, волочение, ковка, объемная и листовая штамповка. При этом относительно признаков классификации нет единого мнения.

Разные исследователи предлагают классифицировать процессы ОМД по следующим признакам:

- горячая или холодная обработка;
- пластическая обработка со снятием или без снятия стружки;

- форма заготовки или форма готовой детали (листовой или прутковый металл, массивное тело);
- вид напряженного состояния металла в течение процесса;
- тип напряжений в течение процесса формоизменения (растягивающие, сжимающие, сдвиговые);
- размеры области деформации (локальная или общая);
- формоизменение при устойчивом или неустойчивом состоянии;
- низкие или высокие скорости деформации;
- первичные или вторичные операции формоизменения и др.

С целью классификации процессов и машин ОМД А.И. Зиминым и А.И. Башкиным предложена периодическая система энерготипов кузнечно-прессовых машин, а В.И. Дунаевым и В.П. Полиевцом – методика описания конструкций прокатных клетей.

Отсюда следует, что отдельно взятый один вид классификации полностью не характеризует данный процесс или конкретную технологическую операцию.

Классификация – самостоятельный вид исследования, отличный от моделирования (эксперименты на физических или математических объектах).

Такие крупнейшие открытия, как эволюционная теория происхождения видов Ч. Дарвина, периодическая система Д.И. Менделеева, теория смены общественных формаций К. Маркса, были сделаны именно методом классификации.

Профессор В.Н. Заверюха предложил использовать метод классификации процессов обработки металлов давлением как самостоятельный вид исследования для формализации поиска новых, лучших способов и устройств в данной области, где признаками классификации могут служить:

- условия кинематики и взаимного расположения металла и инструмента;
- способы введения энергии формоизменения (силы, нагрузки);
- формы энергии, используемой для деформации;
- характеристики получаемых изделий.

Общей основой описания и классификации процессов ОМД может быть *энергетический подход*.

Формальный поиск по условиям кинематики и взаимного расположения металла с инструментом можно вести за счет:

- изменения формы инструмента и заготовки;
- изменения числа инструментов;
- вариации взаимного расположения инструмента и заготовки;
- вариации существующих движений инструмента и заготовки;
- изменения вида инструмента.

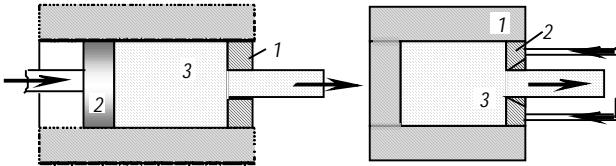
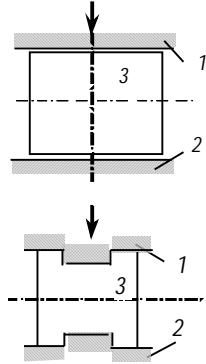
Свободная ковка

Подвижный инструмент 1 перемещается навстречу неподвижному инструменту 2, осуществляя деформацию заготовки 3. Может быть использована кинетическая энергия инструмента (молота, бойка).

Ковка позволяет получать изделия большой длины (прутки) и большой площади (плиты).

Расширение возможностей свободной ковки – усложнение формы (геометрии) инструмента.

Процесс свободной ковки служит основанием для других способов ОМД (прессования, объемной и листовой штамповки).

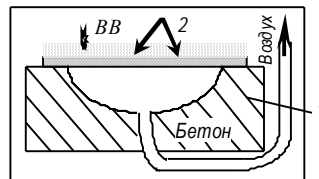
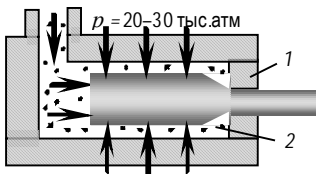
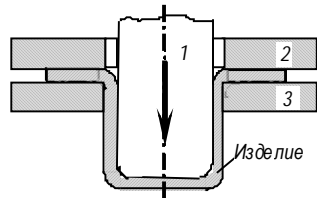
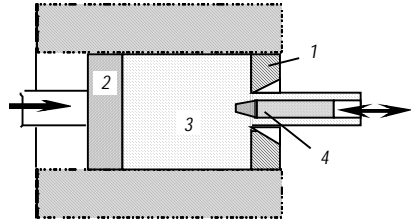


Прессование с прямым или обратным истечением металла

Усложнение процесса прессования может идти по пути *увеличения числа инструментов* (4-новый инструмент – оправка – для получения трубы) или *использования новых движений* (двойная стрелка – возвратно-поступательное движение оправки).

Появление листового проката привело к процессам листовой штамповки, гибки (1–3 – инструменты).

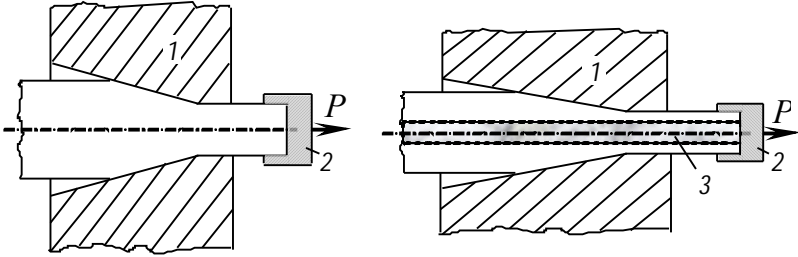
В качестве инструмента может быть использовано *давление жидкости или газа*.



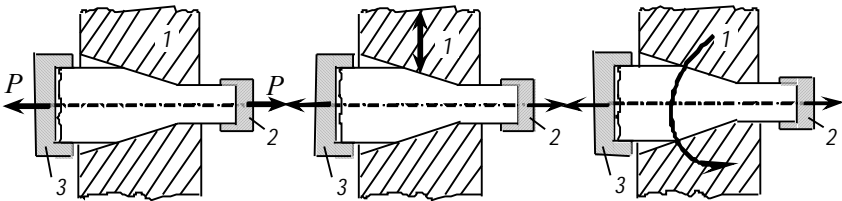
Волочение

Волочение позволяет получить очень длинные изделия с малой площадью и довольно сложной конфигурацией формы поперечного сечения.

Для расширения возможностей вводят третий инструмент – оправку (3).



Для уменьшения трения при волочении, снижения усилия волочения и повышения возможной степени деформации используют новые движения: волочение с противонатяжением, волочение с вибрацией волокна, вращение волокна вокруг оси протягиваемого круглого прутка.

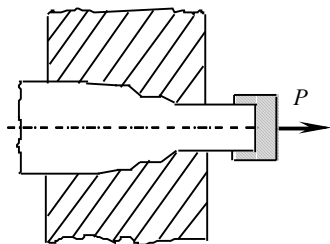


Благодаря вращательному движению волокна, вектор относительной скорости прутка на контактной поверхности, а следовательно, и направление силы трения, отклоняются от образующей конуса; проекция силы трения на ось прутка уменьшается, следовательно, уменьшается и усилие волочения.

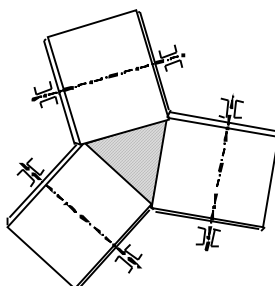
Возможно усложнение инструмента: например, использование многоступенчатой волокна позволяет в одной волоке получить большую степень деформации прутка.

Для снижения сил трения применяют дисковые (роликовые) волокна, которые могут быть классифицированы также по признаку «число инструментов».

В таких волокнах канал образован роликами (дисками), вращающимися в подшипниках качения.



Многоступенчатая волока



Дисковая волока для трехгранного профиля

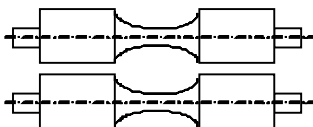
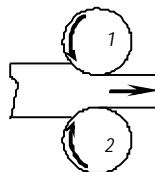
Ролики (диски) не имеют привода и вращаются за счет сил трения о движущийся профиль.

Продольная прокатка

Оба инструмента (валки) вращаются в разные стороны и сообщают обрабатываемому изделию поступательное движение.

Развитие процесса продольной прокатки идет за счет:

- изменения формы инструмента (профилирования) в продольном и поперечном направлениях;

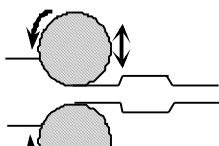


Профилирование валка в продольном направлении

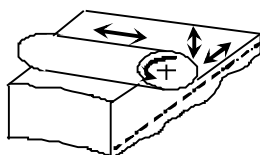


Профилирование валка в поперечном направлении

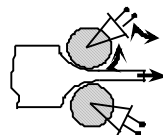
- придания инструменту других движений. Например, еще одно вращательное или поступательное движение (периодическая прокатка), прокатка с ультразвуком (валки совершают сложное движение – и вращаются, и вибрируют), сочетание возвратно-поступательного вращения валков с их подъемом и опусканием (ковочные клетки);



Периодическая прокатка

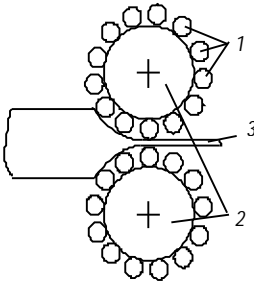


Прокатка с ультразвуком

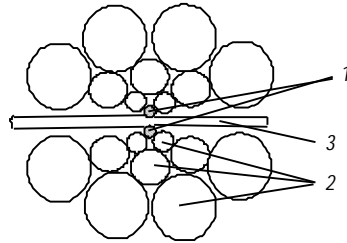


Прокатка в ковочной клетке

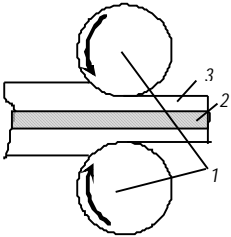
- увеличения числа инструментов;
- изменения движения заготовки (прокатка-волочение).



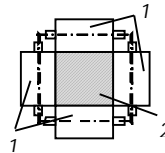
Прокатка металла на планетарном стане:
1 – рабочие валки; 2 – опорные валки;
3 – металл



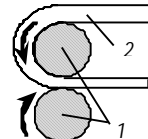
Прокатка металла на 20-валковом стане:
1 – рабочие валки; 2 – опорные валки;
3 – прокатываемая полоса



Прокатка на оправке:
1 – валки; 2 – оправка; 3 – металл



Прокатка в многовалковом калибре:
1 – валки; 2 – металл



Прокатка-волочение:
1 – валки; 2 – металл

Поперечная прокатка

Оба инструмента вращаются в одну сторону, а заготовка – в другую.

Усложнение процесса идет за счет:

- взаимного расположения инструмента;
- увеличения числа инструментов;
- профилировки инструмента.

Если перекосить оси валков, то заготовка получает поступательно-вращательное движение вдоль своей оси, что позволяет получать:

- сложные цилиндрические поверхности. При этом продольная прокатка не происходит (прокатка периодических профилей, ребристые поверхности труб, винты);

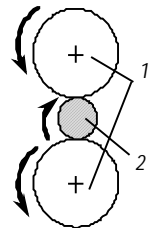
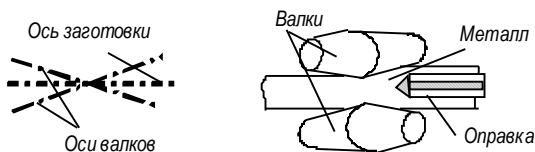


Схема поперечной прокатки:
1 – валки;
2 – металл

– полые заготовки для производства труб.



Кольцевая прокатка

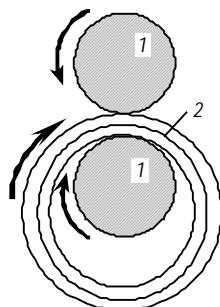
Вращаются и инструмент, и заготовка. При прокатке рулона получается тонкий лист *пакетным способом*.

Клиновая прокатка

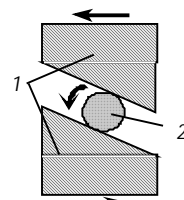
Прокатка осей, двигателей валов. В качестве инструмента используют *профильные плиты*. При этом в середине заготовки за счет растягивающих напряжений образуется полость (получение шурупов, болтов).

Таким образом, развитие формообразующих и формоизменяющих процессов ОМД идет за счет:

- вариации существующих движений инструмента и заготовки, использования новых движений (колебания, дополнительные вращения, возвратно-поступательные движения и др.);
- изменения формы и топологии заготовки и инструмента;
- изменения числа инструментов (многовалковые калибры, оправки, планетарные станы, 20-валковые станы и др.);
- изменения взаимного расположения инструмента и заготовки (поперечно-винтовая прокатка, перекос осей прокатных валков, ...);
- изменения вида инструмента (твердое тело, газ, жидкость).



Кольцевая прокатка:
1 – валки; 2 – лист



Клиновая прокатка:
1 – инструмент;
2 – заготовка

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением: учебник. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.
2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
3. Мастеров В.А., Берковский В.С. Теория пластической деформации и обработка металлов давлением: учебник. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.
4. Материаловедение и технология материалов: учебник / В.Т. Жадан, П.И. Полухин, А.Ф. Нестеров и др. – М.: Металлургия, 1994. – 624 с.
5. Новые процессы деформации металлов и сплавов: учеб. пособие / А.П. Коликов, П.И. Полухин, А.В. Крупин и др. – М.: Высш. шк., 1986. – 351 с.
6. Кобелев А.Г., Потапов И.Н., Кузнецов Е.В. Технология слоистых металлов: учеб. пособие. – М.: Металлургия, 1991. – 248 с.
7. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением: учебник. – М.: Металлургия, 1973. – 496 с.
8. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.
9. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования: учебник. – М.: Металлургия, 1975. – 477 с.
10. Тулупов С.А. Экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния в процессах ОМД: учеб. пособие. – Свердловск: УПИ, 1977. – 39 с.
11. Чиченев Н.А., Кудрин А.Б., Полухин П.И. Методы исследования процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие. – М.: Металлургия, 1977. – 311 с.
12. Хван Д.В., Томилов Ф.Х., Корольков В.И. Экспериментальная механика конечных деформаций: учеб. пособие. – Воронеж, 1996. – 248 с.
13. Шемшурова Н.Г. Изучение процессов обработки металлов давлением. Расчет давления металла на инструмент: учеб. пособие. – Магнитогорск: МГМА, 1996. – 63 с.
14. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
15. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. 2-е изд. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с.
16. Бровман М.Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 256 с.

17. Ефимов В.Н., Бровман М.Я. Сопротивление деформации в процессах прокатки. – М.: Металлургия, 1996. – 254 с.
18. Колбасников Н.Г. Физические основы пластической обработки металлов: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ, 2005.
19. Аркулис Г.Э. Закономерности совместной пластической деформации разных металлов: учеб. пособие. – Магнитогорск: МГМИ, 1990. – 90 с.
20. Пластическое формоизменение металлов / Г.Я. Гун, П.И. Полухин, В.П. Полухин и др. – М.: Металлургия, 1968. – 416 с.
21. Материаловедение и технология металлов: учебник / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюшин и др. – М.: Высш. шк., 2002. – 638 с.
22. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением: Теория пластичности: учебник. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
23. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. – М.: Металлургиздат, 1960. Т. 1. – 376 с.; Т. 2. – 416 с.; Т. 3. – 306 с.
24. Шемшурова Н.Г. Экспериментальные методы определения коэффициента внешнего трения в процессах ОМД: метод. рекомендации. Челябинск: У-СДЭНТП, МГМИ, 1990. – 45 с.
25. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. – М.: Металлургия, 1987. – 791 с.
26. Колбасников Н.Г. Теория ОМД. Сопротивление деформации и пластичность: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ, 2000.
27. Кобелев А.Г. Теория и технология процессовковки и прессования: учеб. пособие. – М.: МИСиС, 2002. – 284 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Вводная лекция.....	3
Раздел 1. Физическая природа пластической деформации.....	8
Кристаллическое строение металлов.....	8
Пластическая деформация монокристаллов.....	9
Механизмы пластической деформации.....	10
Механизмы образования дислокаций.....	14
Взаимодействие и перемещение дислокаций.....	15
Механизмы и способы упрочнения металла.....	16
Способы упрочнения металла.....	18
Пластическая деформация поликристалла. Особенности внутри- и межзеренной деформаций.....	21
Изменения в металле, связанные с пластической деформацией.....	23
Факторы, влияющие на пластические свойства металлов.....	25
Раздел 2. Трение и неравномерность деформации.....	28
Трение при ОМД.....	28
Особенности внешнего трения при ОМД.....	31
Виды трения при ОМД.....	31
Факторы, влияющие на величину контактного трения.....	32
Роль сил трения в процессах ОМД.....	34
Смазка и смазочные материалы.....	35
Граничные условия.....	37
Методы определения коэффициента трения.....	38
Неравномерность деформации при ОМД.....	42
Раздел 3. Формообразование и формоизменение в процессах ОМД 48	48
Формоизменение при ОМД.....	48
Величины, характеризующие деформацию тел (показатели формоизменения).....	49
Феноменологические законы формоизменения при ОМД.....	52
Формообразование при ОМД.....	57
Классификация слоистых металлов и области их применения.....	58
Физическая природа соединения разнородных металлов в твердой фазе.....	60
Факторы, определяющие прочность соединения слоев металлической композиции.....	61
Особенности образования соединения и пластической деформации металлов при совместной прокатке.....	64
Межслоистая неравномерность деформации.....	65
Формообразование при холодной сварке давлением.....	68
Горячая сварка давлением.....	69
Сварка взрывом.....	71
Сварка (спекание) порошков.....	75
Аморфные металлы.....	78
Раздел 4. Свойствообразование и свойствоизменение.....	79
Образование свойств при ОМД.....	79

Холодное деформирование.....	80
Термическая обработка металла после холодного деформирования.....	81
Теплая деформация.....	81
Явление сверхпластичности.....	82
Явление пластичности, наведенной превращением (термомеханическая обработка – ТМО).....	85
Свойствоизменение. Поверхностная пластическая деформация.....	86
Дрессировка.....	89
Раздел 5. Аналитические методы определения энергосиловых параметров процессов ОМД.....	92
Связь между напряжениями и деформациями.....	92
Условие пластичности.....	95
Условие постоянства максимального касательного напряжения (условие Треска–Сен-Венана).....	96
Энергетическое условие пластичности (условие Губера–Мизеса–Генки).....	97
Аналитические методы определения напряжений и деформирующих усилий.....	103
Решение дифференциальных уравнений равновесия совместно с уравнением пластичности.....	104
Пластичность и разрушение.....	117
Влияние механической схемы деформации на усилие деформирования и пластичность.....	120
Методы оценки пластичности (критерии пластичности).....	123
Феноменологическая теория разрушения металлов.....	125
Раздел 6. Экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния в процессах ОМД... 131	131
Исследование процессов пластического формоизменения металла с помощью метода координатных сеток.....	131
Поляризационно-оптический метод исследования напряжений и деформаций.....	138
Метод муаровых полос и его применение для определения напряжений и деформаций.....	144
Определение напряженно-деформированного состояния испытанием твердости.....	149
Микроструктурный метод исследования конечных пластических деформаций металла.....	152
Тензометрический метод в исследовании напряженно- деформированного состояния.....	153
Применение голографии в исследовании деформаций.....	154
Раздел 7. Прессование металлов..... 156	156
Факторы, влияющие на неравномерность деформации.....	159
Гидроэкструзия.....	162
Прессование с активными силами трения.....	164
Заключительная лекция. Классификация процессов ОМД как самостоятельный вид исследования..... 165	165
Библиографический список..... 172	172