

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Конспект лекций и варианты заданий для выполнения курсовой работы

Красноярск
СФУ
2011

УДК 621.73.02(07)

ББК 34.5Я73

Ф 20

Составители: Загиров Н.Н., Рудницкий Э.А.

Ф 20 Теория обработки металлов давлением: Конспект лекций и варианты заданий для выполнения курсовой работы [Текст] / сост. Н.Н. Загиров, Э.А. Рудницкий. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 56 с.

Кратко изложены базовые положения теории обработки металлов давлением, с использованием которых в дальнейшем производится анализ и осуществляется разработка общих принципиальных основ рационального построения процессов пластической деформации. Рассмотрены вопросы, касающиеся основных законов и принципов, которым подчиняется поведение металлов при пластической деформации; наиболее распространенных на практике экспериментальных методов изучения характеристик напряженно-деформированного состояния металла; зависимости прочностных и пластических свойств металла от температурно-скоростных условий протекания процессов деформации; закономерностей и особенностей возникновения контактного трения, а также его учета при пластическом формоизменении; оценки ресурса пластичности при различном характере развития деформации и возможности его повышения при термической обработке.

Для закрепления изложенного материала и контроля полученных знаний по некоторым разделам дисциплины сформулированы типовые задачи, которые оформлены в виде вариантов заданий для выполнения студентами предусмотренной учебным планом курсовой работы по дисциплине «Теория ОМД».

Конспект лекций можно рассматривать и как пособие для самостоятельной работы студентов, проверка знаний которых в этом случае осуществляется путем ответа на сформулированные по каждому разделу тестовые вопросы и задания.

УДК 621.73.02(07)

ББК 34.5Я73

© Сибирский

федеральный

университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	5
1.1. Условие постоянства объема.....	5
1.2. Условие постоянства секундных объемов.....	5
1.3. Закон подобия.....	6
1.4. Принципы наименьшего сопротивления, кратчайшей нормали и наименьшего периметра.....	8
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯЖЕННОГО И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ.....	11
2.1. Тензометрия.....	11
2.2. Метод координатных сеток.....	13
3. СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	15
3.1. Виды деформации при обработке металлов давлением.....	15
3.2. Понятие о сопротивлении деформации.....	16
3.3. Методы определения сопротивления деформации.....	16
3.4. Особенности поведения и изменения сопротивления деформации при холодной обработке.....	20
3.5. Сопротивление деформации при повышенных температурах.....	22
4. ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	27
4.1. Роль трения при обработке металлов давлением.....	27
4.2. Виды трения.....	30
4.3. Законы трения.....	31
4.4. Влияние различных факторов на коэффициент (показатель) трения...	33
4.5. Один из методов экспериментального определения показателей трения	35
5. ПЛАСТИЧНОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ.....	36
5.1. Пластичность металлов и факторы, влияющие на нее.....	36
5.2. Основы расчета предельных деформаций при ОМД.....	40
5.3. Методы экспериментального определения пластических характери- стик металла и оформление полученных результатов в виде диаграм- мы пластичности.....	42
5.4. Модель восстановления запаса пластичности при отжиге холодноте- формированных изделий.....	45
6. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО ТЕОРИИ ОМД.....	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	54
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	55

ВВЕДЕНИЕ

Современное представление о теории обработки металлов давлением формируется благодаря усилиям ряда научных школ, основными из которых всегда считались Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов» и Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина. Имея общую платформу, каждая школа развивает преимущественно свои подходы к освещению вопросов теории пластической деформации, которые обобщены в двух учебниках, написанных М.В. Сторожевым, Е.А. Поповым «Теория обработки металлов давлением» (1977) и В.Л. Колмогоровым «Механика обработки металлов давлением» (2001). Эти учебники рекомендованы в качестве основной литературы при изучении дисциплины «Теория обработки металлов давлением», входящей в учебный план специальности 150106 «Обработка металлов давлением» (ОМД). Однако следует учитывать, что по характеру изложения они доступны лишь тем, кто имеет достаточно высокий уровень математической подготовки.

В настоящем учебном пособии предпринята попытка совместить в одном издании базовые положения теории ОМД, охватывающие основные разделы курса в изложении видных ученых-теоретиков. Естественно, речь можно вести лишь о развернутом плане-конспекте изучения указанной дисциплины, цель которого - дать общее представление о сегодняшнем состоянии и направлениях развития теории ОМД, касающихся:

- основных законов и принципов, на которых базируется поведение металлов при пластической деформации
- экспериментальных методов исследования характеристик напряженно-деформированного состояния металла в процессе обработки давлением;
- термических и механических условий, при которых обеспечиваются наиболее оптимальные режимы пластической деформации металлов и сплавов;
- характера формоизменения заготовок при различных операциях с учетом влияния контактного трения и возникающей при этом неоднородности деформации;
- влияния параметров обработки на механические и физические свойства металлов с целью получения бездефектной продукции и достижения ее наилучших эксплуатационных показателей.

При этом акцент сделан на одном из направлений науки о пластической деформации металлов, а именно, механике пластической деформации.

1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

1.1. Условие постоянства объема

Если деформация, вызванная внешними силами, исчезает при прекращении действия внешних сил и твердое тело полностью восстанавливает свои исходные форму и размеры, то такую деформацию называют упругой. Если же при прекращении действия внешних сил твердое тело не полностью восстанавливает свои исходные форму и размеры, то такую деформацию называют пластической. Как та, так и другая происходят без разрушения деформируемого тела или отдельных его участков, т.е. без нарушения сплошности.

Пластическая деформация литого металла сопровождается незначительным (1-3 %) изменением объема, в результате чего плотность его несколько возрастает за счет ликвидации имеющихся в нем пустот. Это изменение не имеет практического значения при решении задач, связанных с определением напряжений и деформаций, поэтому им в технологических расчетах пренебрегают и считают, что объем тела до пластической деформации равен его объему после деформации. Математически условие постоянства объема можно записать в виде

$$V_i = \text{const}$$

Это выражение является частным случаем закона сохранения массы $m = \rho V = \text{const}$, когда плотность металла ρ в процессе пластической деформации не изменяется.

Условие постоянства объема неразрывно связано с рассматриваемым в некоторых случаях в теории ОМД условием несжимаемости, согласно которому алгебраическая сумма логарифмических степеней деформации по трем взаимно перпендикулярным направлениям равна нулю. При этом по крайней мере одна из степеней деформации имеет знак, противоположный знаку двух других.

1.2. Условие постоянства секундных объемов

С его помощью устанавливают взаимосвязь между скоростью движения металла и изменениями размеров поперечного сечения деформируемой заготовки при непрерывном режиме обработки. Так, например, при реализации прямого метода прессования (рис. 1.1), когда направление выдавливания металла совпадает с направлением движения пресс-штемпеля, скорость истечения получаемого профиля заданного сечения будет напрямую зависеть от скорости перемещения пресс-штемпеля через рабочую втулку контейнера определенного диаметра.

Формулируется закон постоянства секундных объемов следующим образом: объем металла, проходящий в единицу времени через определенное сечение очага деформации, формируемого рабочим инструментом, не меняется при переходе от одного сечения к другому при непрерывном режиме обработки.

Математически закон постоянства секундных объемов выражается соотношением:

$$V_i \cdot F_i = \text{const},$$

где V_i – средняя скорость движения металла в i -ом сечении очага деформации площадью F_i .

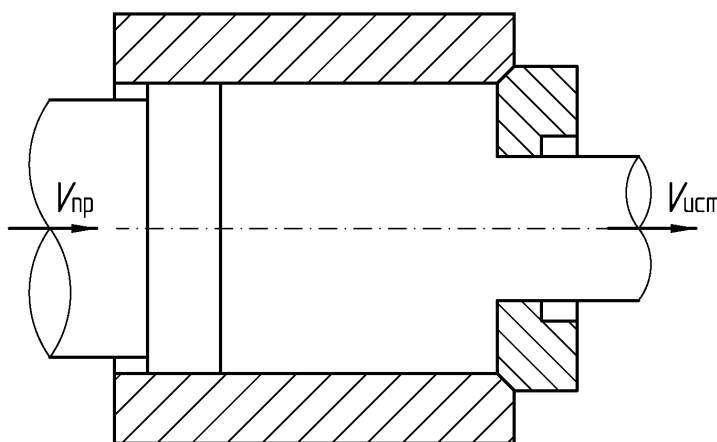


Рис. 1.1. Схема процесса прямого прессования

Для приведенного выше примера прямого прессования это выражение может быть записано в виде

$$V_{\text{пр}} \cdot F_{\text{конт}} = V_{\text{ист}} \cdot F_{\text{изд}},$$

где $V_{\text{пр}}$ – скорость прессования (перемещения пресс-штемпеля);

$F_{\text{конт}}$ – площадь поперечного сечения втулки контейнера;

$V_{\text{ист}}$ – скорость истечения металла из матрицы;

$F_{\text{изд}}$ – площадь поперечного сечения прессуемого профиля.

1.3. Закон подобия

Для того, чтобы закономерности и количественные данные, полученные в лабораторных условиях, можно было бы распространить на производственные условия, необходимо соблюдать подобие этих процессов. Принцип подобия можно сформулировать следующим образом: если осу-

существовать в подобных условиях одинаковые процессы пластического деформирования геометрически подобных тел из одинакового материала, то необходимые удельные усилия деформирования будут равны между собой, отношение полных усилий деформирования будет равно квадрату, а отношение затрачиваемых работ - кубу отношения соответственных линейных размеров.

Под удельным усилием деформирования \bar{P} понимают отношение потребного для деформирования активного усилия P к площади проекции поверхности металла F на плоскость, нормальную к направлению действия этого усилия:

$$\bar{P} = \frac{P}{F}.$$

Удельное усилие деформирования почти всегда можно представить как

$$\bar{P} = m\sigma_s,$$

где σ_s - сопротивление металла пластической деформации;
 m - некоторый безразмерный коэффициент, зависящий от вида осуществляемого процесса деформирования, относительных размеров и формы деформируемой заготовки, а также от условий контактного трения.

Рассмотрим основные условия подобия процессов пластического деформирования.

1. Согласно формулировке принципа, деформируемые тела должны быть геометрически подобны. Для этого необходимо, чтобы отношения соответственных (сходственных) размеров натуре и модели были одинаковы. Например, если даны два прямоугольных параллелепипеда с размерами сторон, соответственно, h_H, b_H, l_H и h_M, b_M, l_M то они будут геометрически подобны, если:

$$\frac{h_H}{h_M} = \frac{b_H}{b_M} = \frac{l_H}{l_M} = m$$

где m - масштаб моделирования.

2. Степени деформации модели и натуре в сравниваемые моменты времени должны быть одинаковы:

$$\varepsilon_M = \varepsilon_H.$$

3. Условия трения между соприкасающимися (контактными) поверхностями деформирующего инструмента и металла должны быть одинаковы.
4. Модель и натура должны быть физически подобны, т.е. во всех соответственных точках иметь одинаковый химический состав, одинаковые микро- и макроструктуры, фазовое состояние, степени упрочнения и разупрочнения.

Если все перечисленные выше условия соблюдаются, то

$$\begin{aligned} \bar{P}_H &= \bar{P}_M; \\ \frac{P_H}{P_M} &= \frac{F_H}{F_M} = m^2; \\ \frac{A_H}{A_M} &= \frac{V_H}{V_M} = m^3, \end{aligned}$$

где \bar{P}_H, \bar{P}_M ; P_H, P_M , и A_H, A_M - соответственно, удельные усилия, полные усилия и работы, затрачиваемые на деформирование натуральной заготовки и модельного образца.

1.4. Принципы наименьшего сопротивления, кратчайшей нормали и наименьшего периметра

При обработке металлов давлением иногда необходимо знать соотношение между перемещениями металла в разных направлениях. Качественно направление течения металла определяют на основании принципа наименьшего сопротивления, который можно сформулировать следующим образом: в случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления.

Для практического применения закона наименьшего сопротивления необходимо знать направление траектории, по которой для точек, на ней расположенных, сопротивление течению будет наименьшим.

Для случая сжатия призматических и цилиндрических тел между параллельными плитами при наличии трения по плоскостям контакта эти траектории определяются по принципу кратчайшей нормали, заключающемуся в том, что перемещение любой точки тела в плоскости, перпендикулярной к направлению действия внешней силы, происходит по кратчайшей нормали к периметру сечения.

Пусть, например, осаживается призма с прямоугольным основанием, некоторое сечение которой в виде плоскости, нормальной к направлению действующего усилия, представлено на рис.1.2.

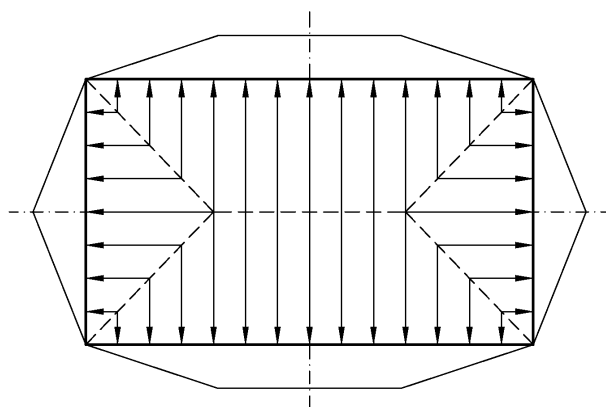


Рис. 1.2. Направление движения точек при осадке призмы с прямоугольным основанием в условиях значительного трения

Согласно указанному принципу, прямоугольник можно разделить на два треугольника и две трапеции линиями, представляющими собой граничные линии или линии раздела сечения, поскольку длина профилей к периметру сечения по обе стороны из каждой точки, лежащей на этих линиях, будет одинаковой. Направление движения точек показано на рис. 1.2 стрелками.

Траектория, по которой движутся точки деформируемого тела, подчиняется принципу наименьшего периметра, который можно сформулировать так: любая форма поперечного сечения призматического или цилиндрического тела при осадке его в условиях максимального контактного трения стремится принять форму фигуры, имеющей при данной площади наименьший периметр, т.е. в пределе стремится к кругу.

Этот принцип позволяет наиболее рационально подбирать форму поперечного сечения исходных заготовок для конкретных случаев пластического деформирования.

Следует отметить, что последние два принципа справедливы для случая, когда трение на поверхностях контакта металла с инструментом изотропно, т.е. одинаково по всем направлениям, и значительно.

При осадке же, например, прямоугольного параллелепипеда плоскими бойками без контактного трения движение частиц в плоскостях, нормальных к направлению действия внешней силы, носит радиальный характер, и поперечные сечения в процессе деформации будут оставаться подобными исходным (рис. 1.3).

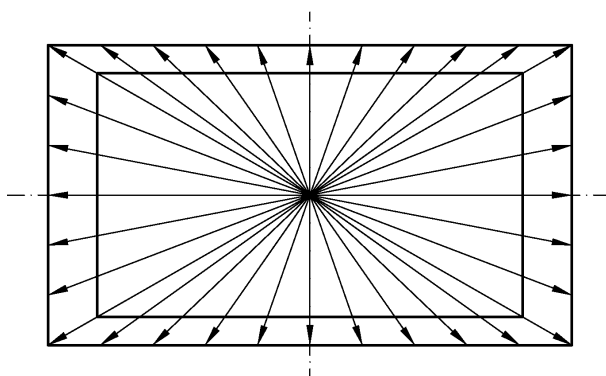


Рис. 1.3. Направление движения точек при осадке призмы с прямоугольным основанием в условиях минимального трения

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯЖЕННОГО И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

С помощью экспериментальных методов решают следующие практические задачи:

- определяют полное усилие, необходимое для деформации;
- устанавливают распределение нормальных и касательных напряжений на поверхности контакта деформируемого тела с инструментом;
- находят распределение деформаций и напряжений по объему.

2.1. Тензометрия

В настоящее время полное усилие (усилие прессы при осадке, давление металла на валки при прокатке, тяговое усилие при волочении и т.п.) не измеряют непосредственно, так как это трудно осуществить, а во многих случаях практически невозможно. Для их определения применяют различные силоизмерители (месдозы), которые вместе со вспомогательными и регистрирующими приборами в целом называют тензометрической аппаратурой.

Месдозы преобразуют действующую на них нагрузку в упругую деформацию, фиксируемую в виде электрического сигнала.

Датчик сопротивления (рис. 2.1) представляет фольговый или проволочный проводник, который клеивают между двумя слоями тонкого диэлектрика (бумага и т.п.). Размеры датчика таковы, что $l \gg a$. Фольга или проволочка датчика выполнены из сплава, обладающего тензоэффектом (например, константана).

Тензоэффектом называют обратимое изменение сопротивления проводника от механических упругих деформаций. Обратимое изменение сопротивления происходит не только вследствие изменения размеров, но и за счет удельного сопротивления. Растяжение датчика вдоль направления l сопровождается увеличением его сопротивления, а сжатие - уменьшением

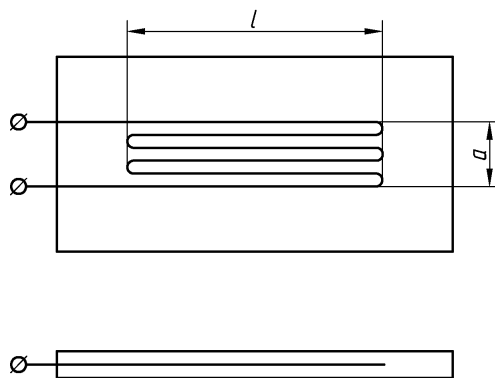


Рис. 2.1. Датчик сопротивления

Датчики, наклеенные на упругий элемент месдозы, включают в мостовую схему (рис.2.2), принцип работы которой заключается в следующем.

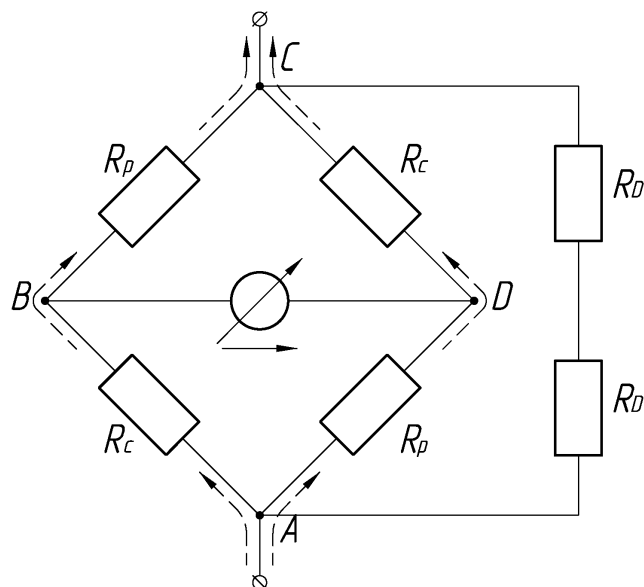


Рис. 2.2. Мостовая электрическая схема соединения тензодатчиков

Сила P , действующая на месдозу, приводит к уменьшению сопротивления R_c сжатого датчика, наклеенного вдоль образующей, и увеличению сопротивления R_p растянутого датчика, наклеенного по окружности цилиндра. Балансировка моста от нагрузки P будет нарушена и возникает ток через диагональ BD , направление которого на схеме показано сплошными стрелками.

Свойства датчиков и жесткость упругого элемента месдозы подбирают таким образом, чтобы сила тока была пропорциональна нагрузке P .

Ток, возникающий в диагонали BD моста, фиксируют в простейшем случае с помощью осциллографа, записывающего отклонение луча малоинерционного гальванометра на движущуюся фоточувствительную бумагу. Для расшифровки показаний осциллографа применяют тарировочные графики, связывающие показания приборов с величиной известной градуировочной нагрузки.

Конфигурация поверхности корпуса месдозы выполняется в соответствии с формой той части рабочего инструмента, где она применяется (например, в соответствии с поверхностью штампа или прокатного вала).

Описанный выше способ определения внешних поверхностных напряжений не лишен недостатков, к числу которых относят:

1. ограниченные возможности для исследования напряженного состояния, позволяющие определить напряжения только на поверхности контакта металла с инструментом;

2. методика сложна и требует ювелирной работы при изготовлении деталей, их монтаже и проведении опытов;
3. инструмент теряет сплошность, и это не может не вызвать некоторого возмущения в напряженно-деформированном состоянии исследуемого материала, которое трудно оценить.

2.2. Метод координатных сеток

Экспериментальное изучение распределения деформаций в теории ОМД проводят с помощью метода координатных (делительных) сеток.

Сущность метода заключается в следующем. Деформируемый образец разрезают вдоль его оси по одной из диаметральных плоскостей (плоскость симметрии) на две половинки. На плоской поверхности одной из них делают продольные и поперечные риски с постоянным шагом, образующие прямоугольную сетку (нанесение сетки можно производить и типографским способом).

Затем на поверхность разъема наносят какой-либо разделительный состав (жидкое стекло, сплав Вуда), предохраняющий от сваривания, после чего обе половинки складывают, скрепляют друг с другом и деформируют. После деформации образец разъединяют и по изменениям формы и размеров ячеек сетки судят о характере и величине деформации в различных его точках.

На рис. 2.3 показаны вид и параметры одной из ячеек координатной сетки, нанесенной на плоскость разъема образца до деформации и после.

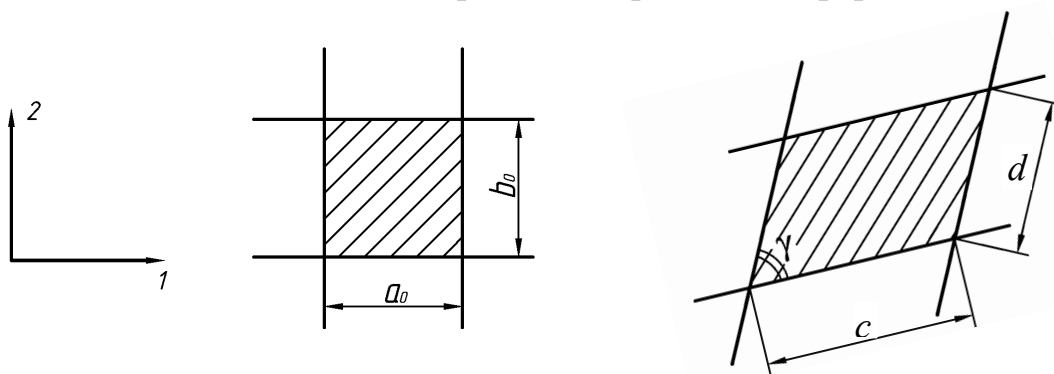


Рис. 2.3. Параметры ячейки до и после деформации

Обработка результатов производится в следующей последовательности:

1. Рассчитывают параметры деформированной ячейки по главным направлениям 1 и 2, соответствующим сторонам исходной квадратной ячейки:

$$a_1 = \sqrt{\frac{c^2 + d^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{c^2 + d^2}{2}\right)^2 - c^2 d^2 \sin^2 \gamma}};$$

$$b_1 = \sqrt{\frac{c^2 + d^2}{2} - \sqrt{\left(\frac{c^2 + d^2}{2}\right)^2 - c^2 d^2 \sin^2 \gamma}} .$$

2. Определяют величины логарифмических деформаций в направлении осей 1 и 2:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{a_1}{a_0}; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{b_1}{b_0} .$$

Отрицательное значение ε свидетельствует о том, что в этом направлении произошло уменьшение размеров ячейки.

3. Находят степень деформации сдвига в рассматриваемом сечении:

$$\lambda = 2\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2} .$$

Сравнение двух любых соседствующих ячеек показывает деформацию ячейки за некоторый интервал времени. При этом предполагается, что в пределах ячейки она однородна и равна среднему значению по объему, ограниченному ячейкой.

3. СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

3.1. Виды деформации при обработке металлов давлением

Основным признаком, по которому в теории ОМД производится деление пластической деформации на виды, является температура. Она определяет соотношение процессов упрочнения и разупрочнения, происходящих параллельно в деформируемом теле.

Совокупность явлений, связанных с повышением прочностных свойств металлов в процессе пластической деформации, называется деформационным упрочнением или наклепом.

Если в ходе пластической деформации прочностные характеристики металла понижаются, то речь идет о так называемом разупрочнении металла.

Упрочняющие и разупрочняющие процессы протекают во времени с определенными скоростями, обусловленными условиями деформации и природой деформируемого металла. В зависимости от того, какой из процессов является преобладающим, результаты деформации будут различны.

Существует несколько вариантов деления пластической деформации на виды, из которых на практике наибольшее распространение получил тот, по которому различают только горячую и холодную деформации.

Пластическую деформацию металлов называют горячей, если она осуществляется при температуре, равной или выше температуры начала рекристаллизации ($T \geq T_{\text{рекр}}$). Температура T берется в Кельвинах. Рекристаллизация ($T_{\text{рекр}} = 0,4 \cdot T_{\text{пл}}$), т.е. процесс роста новых недеформированных зерен, вызывающий восстановление всех первоначальных физико-механических характеристик металла, успевает пройти полностью, искажения кристаллической решетки отсутствуют.

При холодной деформации рекристаллизация и возврат полностью отсутствуют и деформированный металл имеет все признаки упрочнения. Температурный интервал холодной деформации расположен ниже температур начала рекристаллизации ($T < T_{\text{рекр}}$). В результате холодной деформации сопротивление металла деформации увеличивается, пластичность уменьшается. Используется она обычно на конечных стадиях получения изделий для обеспечения точности размеров, требуемого уровня свойств и высокого качества поверхности.

Согласно приведенной классификации холодная и горячая деформации не связаны с конкретными температурами нагрева, а зависят только от протекания процессов упрочнения и разупрочнения. Определить вид деформации можно по заданной температуре обработки металла (таблица 3.1).

Таблица 3.1

Установление вида деформации по заданной температуре обработки

Металл	$\Theta_{\text{обр}}, ^\circ\text{C}$	$\Theta_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл}}, \text{K}$	$T_{\text{рекр}}, \text{K}$	$\Theta_{\text{рекр}}, ^\circ\text{C}$	Вид деформации
Pb	20	327	600	240	-33	Горячая
	-					-
Al	90	660	933	373	100	Холодная
	250					Горячая
Cu	250	1083	1356	542	269	Холодная
	400					Горячая

3.2. Понятие о сопротивлении деформации

Сопротивление металлов пластической деформации является важной характеристикой свойств обрабатываемого металла, позволяющей судить о его прочности, а следовательно, и о тех нагрузках, которые необходимо развить, чтобы осуществить пластическую деформацию металлов. Кроме того, величина сопротивления деформации входит в расчетные аналитические формулы в виде сомножителя (например, в физические уравнения связи напряженного и деформированного состояний), поэтому точность при ее нахождении в значительной степени определяет точность того или иного расчетного метода.

Сопротивлением металла пластической деформации (обозначается σ_s , единицы измерения $\text{МПа} = \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$) называют напряжение одноосного растяжения или сжатия в условиях развитой пластической деформации.

3.3. Методы определения сопротивления деформации

Методов определения сопротивления деформации металлов существует много, но основными (стандартизованными) являются растяжение и сжатие образцов с цилиндрической рабочей частью.

Испытание на растяжение является одним из распространенных и простых методов определения σ_s , поскольку именно этим способом проще всего достигается одноосное напряженное состояние, которое сохраняется в образце до образования шейки.

Сущность метода заключается в следующем. Образец (рис.3.1) с известным соотношением размеров рабочей части $l_0 / d_0 = 5 \dots 10$ (ГОСТ 1497 - 73) растягивают силой P , при этом относительная скорость перемещения захватов испытательной машины составляет ϑ .

По ходу опытов в каждый момент времени регистрируют силу деформирования P образца и величину абсолютного его удлинения $\Delta l = l - l_0$.

Сопротивление металла пластической деформации определяют по формуле:

$$\sigma_s = \frac{P}{F}; \quad (3.1)$$

где

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = F_0 \frac{l_0}{l} = F_0 \frac{l_0}{l_0 + \Delta l} \quad (3.2)$$

– текущая площадь поперечного сечения образца.

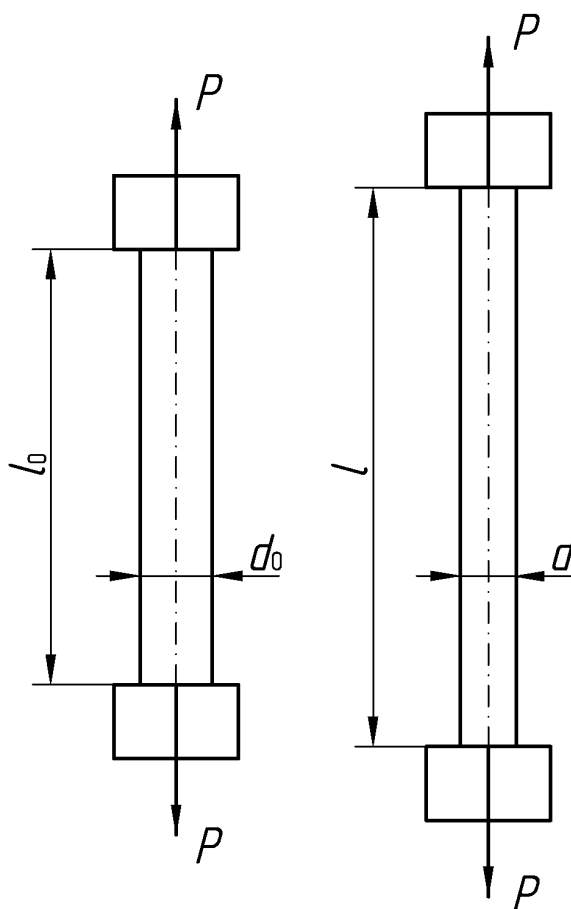


Рис. 3.1. Вид и размеры образца для определения сопротивления деформации методом растяжения до и после испытания

Степень деформации сдвига при развитом пластическом растяжении:

$$\lambda = \sqrt{3} \cdot \ln \frac{l}{l_0}, \quad (3.3)$$

где $l = l_0 + \Delta l$ - текущая длина образца.

Таким образом, диаграмма $P \sim \Delta l$ путем несложного пересчета в соответствии с формулами (3.1) и (3.3) превращается в диаграмму $\sigma_s \sim \lambda$, по оси ординат которой откладывают сопротивление деформации σ_s , а по оси абсцисс - степень деформации сдвига λ .

В зависимости от вида характеристики относительной деформации при растяжении в качестве ее показателя наряду с λ могут выступать (обозначение условное):

$$\begin{aligned} \text{а) степень деформации} - \varepsilon &= \ln \frac{l}{l_0}; \\ \text{б) относительное удлинение} - \delta &= \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\%; \\ \text{в) относительное сужение} - \psi &= \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100\%; \end{aligned} \quad (3.4)$$

В пределах равномерного удлинения образца, т.е. до момента образования шейки, между ними легко установить определенные соотношения, воспользовавшись условием постоянства объема (3.2). Так, например:

$$\lambda = \sqrt{3} \cdot \ln \frac{l}{l_0} = \sqrt{3} \cdot \ln \left(\frac{\delta}{100\%} + 1 \right). \quad (3.5)$$

Несмотря на простоту и отработанность методики экспериментирования, испытание на растяжение обладает рядом недостатков. При сравнительно небольшой деформации нарушается однородность ее распределения, образуется шейка, напряженное состояние значительно отклоняется от одноосного. Для многих металлов и сплавов образование шейки начинается уже при $\lambda = 0,3 \dots 0,5$. Другим недостатком метода является низкая скорость деформации, так как на стандартных разрывных машинах средняя скорость не превышает $0,1 \text{ с}^{-1}$. На практике обработка металлов давлением осуществляется чаще всего с деформациями и скоростями, превышающими указанные значения.

Методом определения сопротивления деформации металлов и сплавов, позволяющим осуществлять деформацию до значительно больших величин, чем при растяжении, является осадка цилиндрических образцов плоскими полированными бойками (рис.3.2).

Для испытания применяются образцы с отношением высоты к диаметру $1 < h_0 / d_0 < 2$. Осадка низких образцов сопровождается искажением опытных данных из-за влияния трения, высокие образцы теряют устойчивость, получая продольный изгиб.

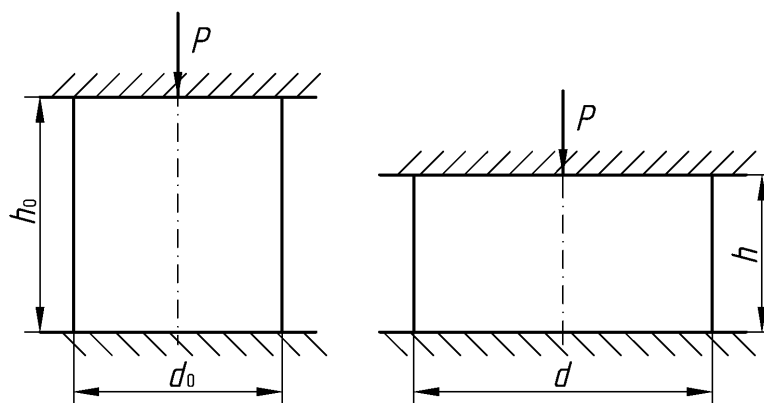


Рис. 3.2. Схема испытания для определения сопротивления деформации методом сжатия

Диаграмма $P \sim \Delta h$ (сила сжатия - уменьшение высоты образца или абсолютное обжатие), полученная в ходе испытаний, может быть легко перестроена в переменных $\sigma_s \sim \lambda$. Для этого необходимо воспользоваться соотношениями:

- для нахождения σ_s :

$$\sigma_s = \frac{P}{F}, \quad (3.6)$$

где $F = \frac{\pi d^2}{4} = F_0 \frac{h_0}{h} = \frac{F_0 h_0}{h_0 - \Delta h}$ – текущее значение площади поперечного сечения образца;

- для нахождения λ :

$$\lambda = \sqrt{3} \cdot \ln \frac{h_0}{h} = \sqrt{3} \cdot \ln \frac{h_0}{h_0 - \Delta h}. \quad (3.7)$$

При испытании на осадку отрицательным фактором является невозможность точной оценки величины сил трения между деформирующим инструментом и деформируемым материалом. Несмотря на хорошую смазку и специальную обработку рабочих поверхностей инструмента, часто не удается избежать искажения боковой поверхности образца (бочкообразования), что свидетельствует об отклонении напряженного состояния от линейного.

3.4. Особенности поведения и изменения сопротивления деформации при холодной обработке

Основным показателем, влияющим на сопротивление деформации при холодной обработке, является степень деформации. Как уже упоминалось выше, под термином «степень деформации» в принципе могут подразумеваться разные определяемые по формулам (3.4), величины, не имеющие к тому же единого обозначения в различных литературных источниках и справочниках. Вместе с тем численные значения и размерность получаемых показателей от формул, по которым они рассчитываются, зависят напрямую. Поэтому по тексту, как и на представленных далее рисунках степень деформации в некоторых случаях вместо « λ » может быть обозначена символом « ε », а единицы измерения, в которых она выражается – могут варьироваться от логарифмических показателей до процентов.

Зависимость между сопротивлением деформации и степенью деформации изображают кривыми упрочнения, при построении которых по оси ординат обычно откладывают сопротивление металла пластической деформации σ_s , а по оси абсцисс - относительную деформацию. В некоторых случаях по оси абсцисс откладывают логарифмическую деформацию, удобство использования которой заключается в том, что логарифмические деформации обладают свойством аддитивности, т.е. результирующая деформация равна сумме промежуточных деформаций. Кроме того, логарифмические деформации, выраженные через изменение линейных размеров, при растяжении и сжатии являются эквивалентными по упрочняющему эффекту.

Как уже говорилось ранее, при холодной ОМД с увеличением степени деформации повышаются все показатели прочности, в том числе и сопротивление деформации. Увеличение σ_s особенно интенсивно происходит на начальных стадиях деформации (до $\lambda \approx 0,5$), при дальнейшем повышении степени деформации интенсивность упрочнения снижается. Вид кривых упрочнения для некоторых металлов и сплавов показан на рис. 3.3.

Опыты показывают, что для большинства металлов (для которых температура обработки не равна и не выше температуры рекристаллизации) зависимость $\sigma_s = f(\lambda)$ не чувствительна к скорости деформации. Другими словами можно сказать, что металлы в холодном состоянии не проявляют вязких свойств.

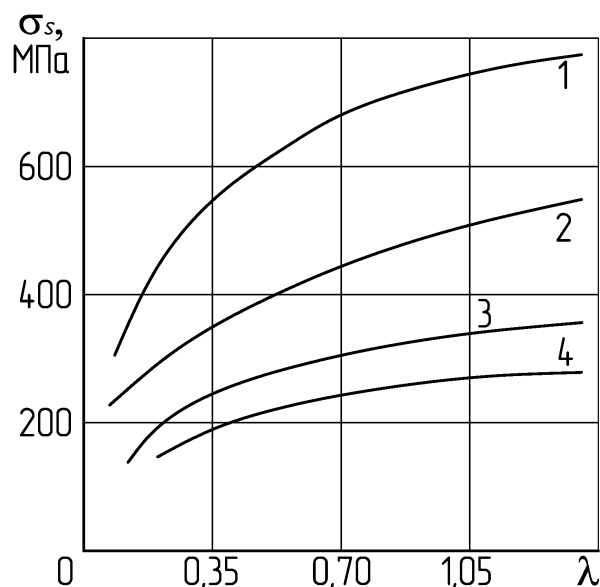


Рис. 3.3. Кривые упрочнения для некоторых металлов и сплавов:
 1 – никель НП2; 2 – латунь Л63; 3 – медь М1; 4 – дюралюминий Д1.

В соответствии со схемой деформации при холодной обработке изменяется и форма зерен - в направлении деформации растяжения они вытягиваются, а в направлении деформации сжатия - сжимаются. Такое строение приводит к тому, что механические свойства наклепанного металла будут неодинаковы в разных направлениях, т.е. металл становится анизотропным.

Кроме того, с изменением формы зерен происходит упорядочение ориентировки их решетки в результате кристаллографической направленности скольжения по определенным плоскостям и направлениям, образуется, так называемая, текстура деформации.

Появление текстуры деформации наблюдается при некоторой степени деформации (примерно при $\lambda = 0,8 \dots 1,0$), и с ее ростом увеличивается и степень совершенства текстуры. Поэтому образование текстуры деформации играет большую роль в таких процессах ОМД, как холодная прокатка тонких листов и лент, волочение проволоки, где степень деформации достигает больших значений.

Кривыми упрочнения можно пользоваться для анализа характера и степени влияния упрочнения на величину необходимых при ОМД усилий деформирования. С этой целью широкое распространение получила свойственная только холодной обработке, так называемая, гипотеза единой кривой, сущность которой заключается в следующем: характер кривых $\sigma_s = \sigma_s(\lambda)$, не зависит от вида деформации (растяжение, сжатие, кручение и т.п.), каким они получены, построение их может осуществляться на основании простейших опытов, а результаты могут быть использованы при анализе сложных процессов ОМД.

Для облегчения аналитического решения задачи по установлению влияния упрочнения на величину усилия деформирования и на распределение напряжений в деформируемом теле, часто необходимо кривую упрочнения представлять в виде уравнения, связывающего сопротивление деформации со степенью деформации. Формула, удовлетворительно описывающая кривую упрочнения для развитых деформаций, существенно превышающих упругие, для многих металлов и сплавов имеет вид:

$$\sigma_S = \sigma_{S0} + a \cdot \lambda^b$$

где a , b - эмпирические коэффициенты, которые выбирают из условия лучшей аппроксимации опытных данных.

3.5. Сопротивление деформации при повышенных температурах

В общем случае сопротивление деформации σ_S при горячей обработке зависит от степени деформации ε , температуры $\bar{\Theta}$, скорости деформации ξ и истории деформирования $\varepsilon(t)$. Знать сопротивление деформации при высоких температурах особенно важно, так как практически весь выплавляемый металл, если он подвергается пластической деформации, проходит стадию высокотемпературной обработки.

В теории ОМД принято сопротивление деформации при горячей обработке представлять в зависимости от степени деформации ε при постоянных скорости ($\xi = \text{const}$) и температуре ($\Theta = \text{const}$) испытания.

Эти зависимости получают на испытательных машинах специальной конструкции, которые называют пластометрами. Обычные типовые испытательные машины не позволяют осуществлять испытания при скоростях, характерных для горячей пластической обработки.

Рассмотрим влияние отдельных факторов, влияющих на сопротивление деформации при горячей обработке.

1. Степень деформации.

Почти у всех цветных металлов и сплавов сопротивление деформации в области малых степеней деформации растет с увеличением ε (рис.3.4). После достижения максимума (при $\varepsilon = \varepsilon_{кр}$), зависящего от многих факторов, более сильно начинает проявляться действие процесса динамического разупрочнения, что приводит к уменьшению σ_S с дальнейшим ростом степени деформации.

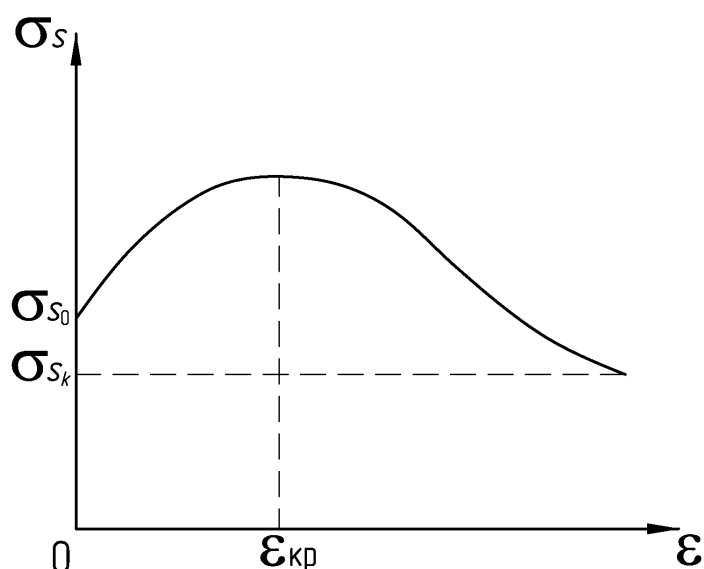


Рис. 3.4. Характерная зависимость сопротивления деформации от степени деформации при горячей обработке

При одинаковой скорости упрочнения и разупрочнения сопротивление деформации не зависит от степени деформации. Иногда величина σ_s при больших степенях деформации может быть меньше, чем исходная при одинаковых прочих условиях деформации. Степень деформации, при которой происходит разупрочнение, почти не зависит от скорости деформации. При увеличении температуры деформации она уменьшается.

2. Температура нагрева металла.

При повышении температуры металла увеличивается амплитуда тепловых колебаний атомов, все прочностные характеристики, в том числе и сопротивление деформации, понижаются. На рис.3.5 отображено влияние температуры на характер зависимости $\sigma_s = f(\varepsilon)$ при $\xi = \text{const}$ для горячей обработки одного из медных сплавов.

Как видно из рис. 3.5, соотношение температур подчиняется условию $\Theta_1 < \Theta_2 < \Theta_3$, т.е. верхняя кривая соответствует минимальному значению Θ . По характеру представленных линий (рис.3.5) также видно, что с увеличением температуры нагрева металла уменьшается степень деформации, при которой начинается разупрочнение.

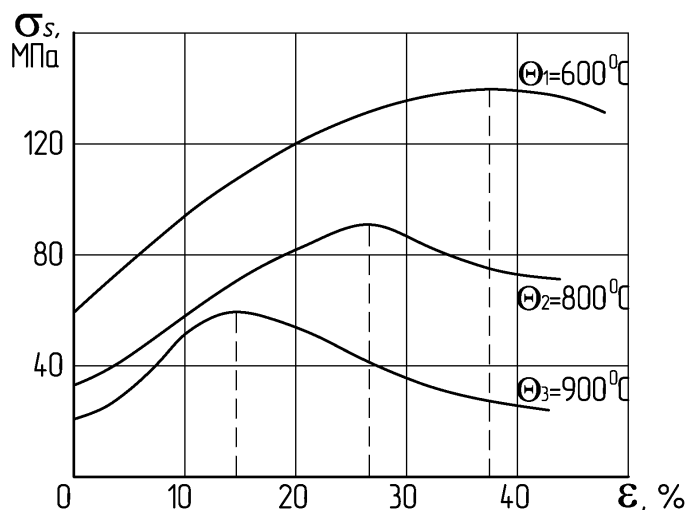


Рис. 3.5. Влияние температуры металла на характер зависимости сопротивления деформации от степени деформации

3. Скорость деформации.

Обработка давлением на прессах и ковочных машинах ведется при средней скорости движения рабочего органа машины в пределах примерно 0,1...0,5 м/с. При обработке на молоте воздействие на металл носит уже динамический характер; скорость бабы молота в момент удара составляет 5-10 м/с, а весь процесс деформации за один удар длится лишь сотые доли секунд. Еще более высокие скорости деформирования возникают при штамповке на высокоскоростных молотах (~20...30 м/с и выше). Поэтому важно знать, как влияет скорость деформации на сопротивление деформации.

Как отмечалось ранее, при горячей обработке давлением одновременно протекают процессы, воздействующие на сопротивление деформации как бы в противоположных направлениях: упрочнение (наклеп) и разупрочнение (возврат, полигонизация, рекристаллизация). Оба процесса протекают во времени с различной скоростью. Причем процесс разупрочнения, особенно по типу рекристаллизации, протекает со скоростью меньшей, чем скорость деформации промышленных процессов обработки давлением.

В большинстве случаев в момент деформации разупрочнение происходит в результате возврата и, реже, в результате рекристаллизации, которая проявляется уже после окончания деформации.

Следовательно, чем больше скорость деформации, тем меньше разупрочнение, тем больше сопротивление деформации.

На рис. 3.6 приведен вид кривых, отражающих зависимость σ_s от степени ϵ и скорости деформации ξ при $\Theta = \text{const}$, характерный в целом для горячей обработки многих алюминиевых сплавов.

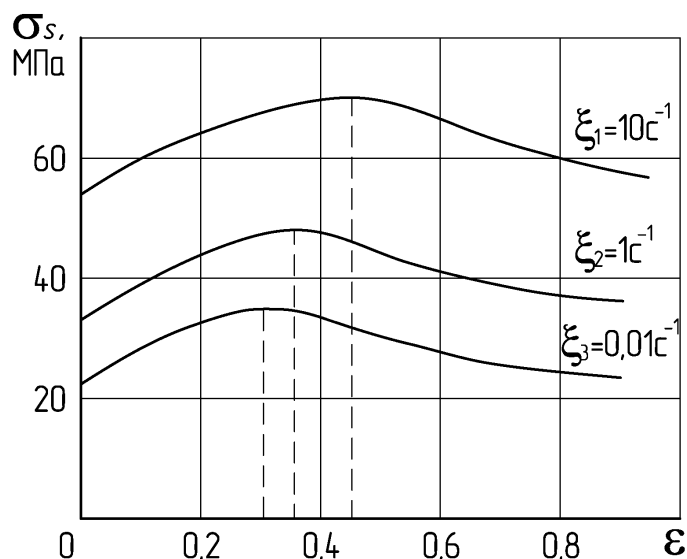


Рис. 3.6. Влияние скорости деформации на характер зависимости сопротивления деформации от степени деформации

Как видно из рис. 3.6, при горячей обработке соотношение скоростей деформации подчиняется условию $\xi_1 > \xi_2 > \xi_3$. При этом степень деформации, при которой начинает происходить разупрочнение, почти не зависит от скорости деформации. Учет влияния степени и скорости деформации на σ_s осложняется тем, что с увеличением степени деформации снижается температура разупрочняющих процессов, повышаются выход тепла и температура деформируемого тела. В свою очередь, увеличение скорости деформации способствует повышению температуры, снижая потери тепла в окружающую среду. Таким образом, увеличение скорости и степени деформации прямо повышают сопротивление деформации, а косвенно, наоборот, снижают его.

При горячей обработке, когда выход тепла невелик, упрочняющее действие обоих факторов преобладает, и сопротивление деформации повышается с увеличением степени и скорости деформации.

4. Развитие деформации во времени.

Современные машины для ОМД, как правило, быстродействующие, и рекристаллизация не успевает полностью снимать упрочнение металла по ходу горячей деформации. Соответственно, σ_s в каждый момент времени определяется не только температурой Θ и достигнутой степенью деформации ϵ , но и развитием деформации ϵ во времени t (рис.3.7).

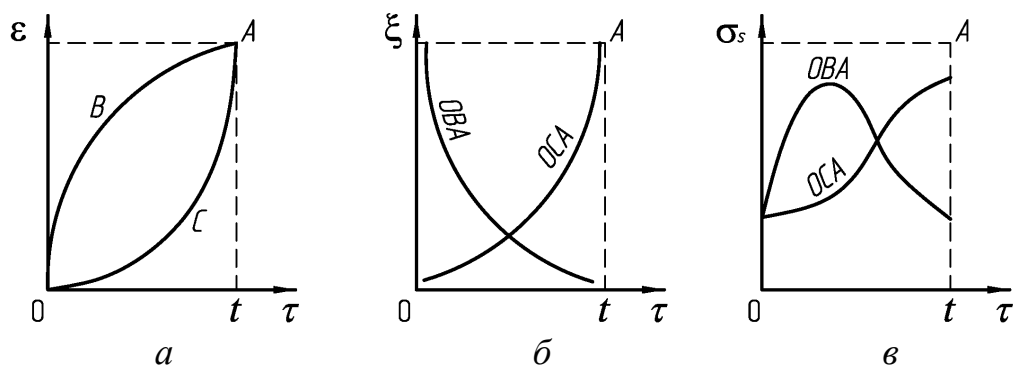


Рис. 3.7. Влияние истории развития деформации во времени на сопротивление деформации

Пусть за интервал времени от 0 до t металл был продеформирован со степенью, соответствующей величине ϵ (рис. 3.7, *a*). Если деформация протекала по траектории OBA , т.е. сначала быстро, а затем медленно (рис. 3.7, *б*), то упрочнение, достигнутое на участке OB ускоренной деформации, успеет значительно уменьшиться (говорят, что σ_s “релаксирует”) на участке BA медленной деформации (рис. 3.7, *в*). В момент времени t металл будет разупрочненным. Обратная картина наблюдается для траектории OCA .

4. ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

4.1. Роль трения при обработке металлов давлением

При обработке металлов давлением смещаемый объем деформируемого тела стремится к некоторому перемещению по поверхности инструмента. При этом возникают силы трения, затрудняющие это скольжение.

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

В механике, как известно, различают два вида трения: качения и скольжения. Для обработки металлов давлением в целом характерно трение скольжения. Основные отличия трения при ОМД и трения в деталях машин следующие:

1. При ОМД на поверхности трения действуют высокие давления, достигающие величин 250 МПа и более. В подшипниках скольжения общего назначения и узлах машин давление на поверхности трения не превышает значений 10-20 МПа.
2. При ОМД происходит значительное обновление поверхности контакта инструмента с деформируемым металлом в связи с общим увеличением поверхности последнего. В подшипниках же обновление поверхности контакта носит незначительный характер, которое происходит только в результате износа.
3. Смещение частиц металла по контактной поверхности трущихся деталей в машинах, как правило, одинаково во всех точках контакта, а при ОМД величина и скорость смещения различны для различных точек контакта.

Условия трения об инструмент во многом определяют эффективность процессов ОМД. За исключением отдельных операций (таких, как прокатка, вальцовка, некоторые операции листовой штамповки), трение при ОМД является вредным фактором, и предпринимаются все возможные меры для его снижения.

Отрицательная роль трения заключается в следующем.

1. Контактное трение ведет к возникновению неоднородности деформации или усиливает эту неоднородность, если последняя определяется самим характером осуществляемой операции. В результате может измениться схема напряженного состояния, задающаяся условиями нагружения. Например, наличие сил трения при осадке (рис.4.1) создает объемную схему напряжений, в то время как при отсутствии трения напряженное состояние было бы линейным.

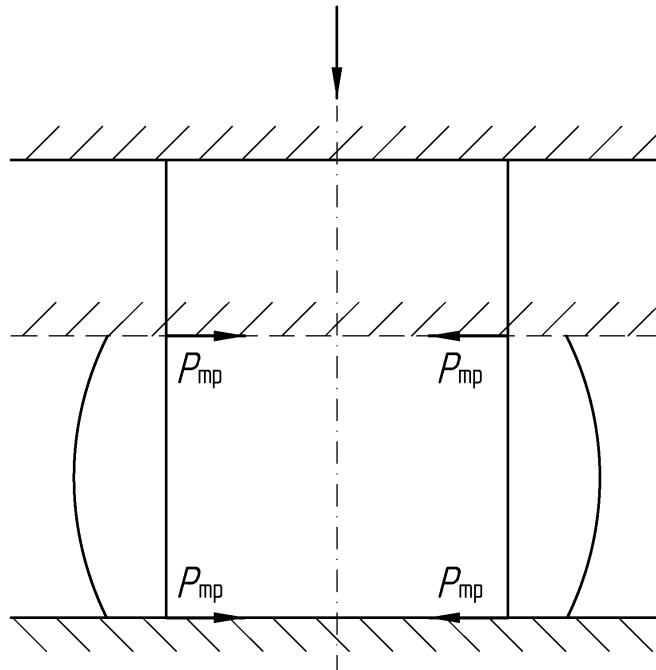


Рис. 4.1. Схема процесса осадки цилиндрической заготовки и направления действующих на контакте сил трения

Влияние действующих сил трения от контактных поверхностей распространяется в глубину деформируемого тела, таким образом создавая в нем зоны затрудненной деформации. В результате цилиндрическая заготовка приобретает бочкообразную форму.

2. Контактное трение в конечном итоге преодолевается дополнительной активной нагрузкой. Следовательно, чем значительнее контактное трение, тем большее необходимое деформирующее усилие и работа деформации требуются для осуществления самого процесса.

Увеличение усилия бывает весьма заметным - в несколько раз. Например, при прямом прессовании прутков (рис. 4.2) полное усилие прессования складывается из нескольких составляющих:

$$P = P_{\text{деф}} + P_{\text{трк}} + P_{\text{трм}} + P_{\text{трп}}$$

где $P_{\text{деф}}$ - усилие, затрачиваемое непосредственно на осуществление деформации без учета трения; $P_{\text{трк}}, P_{\text{трм}}, P_{\text{трп}}$ - усилия, затрачиваемые на преодоление сил трения, соответственно, на стенке контейнера, обжимающей части матрицы и калибрующем пояске матрицы.

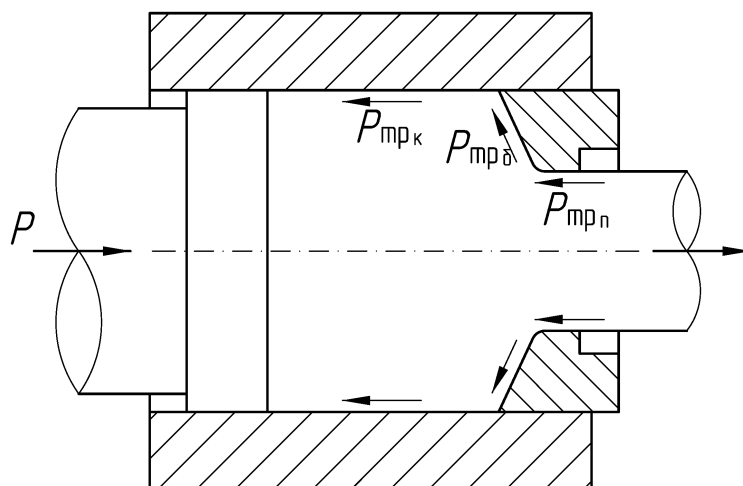


Рис. 4.2. Схема процесса прямого прессования прутка и направление действия сил трения

Увеличение любой из составляющих сил трения $P_{тр}$ приводит к повышению общего усилия прессования.

3. Контактное трение снижает стойкость инструмента, как в результате непосредственного износа контактной поверхности, так и вследствие дополнительного разогрева поверхности и увеличения напряжений в связи с ростом деформирующего усилия. Этот фактор имеет первостепенное значение, например, при волочении проволоки (рис.4.3).

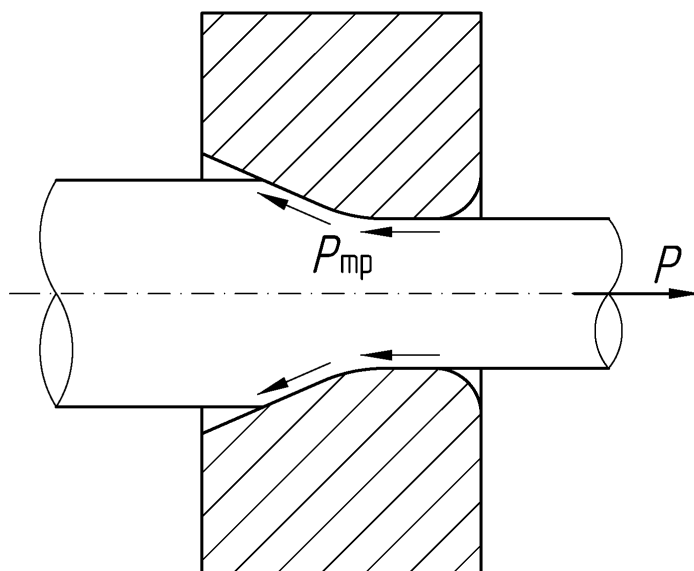


Рис. 4.3. Схема процесса волочения проволоки и направление действия сил трения

В отдельных случаях развитые силы трения являются необходимым условием осуществления процесса и для их повышения применяют специальные меры. Так, в момент захвата полосы вальцами при прокатке (рис.4.4), в месте контакта действуют силы трения, втягивающие полосу в зазор меж-

ду валками. Для их усиления применяют даже специальные меры, например, наносят на поверхность валков насечки, увеличивая тем самым их шероховатость.

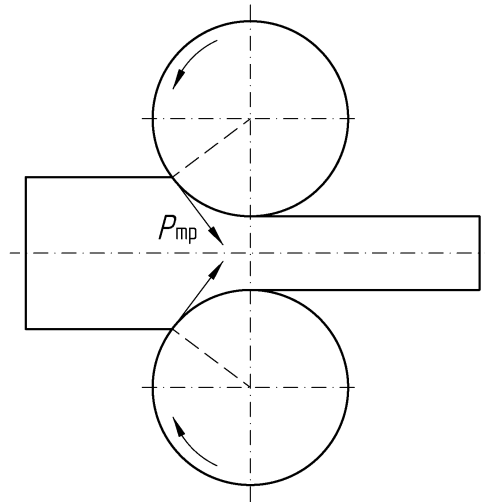
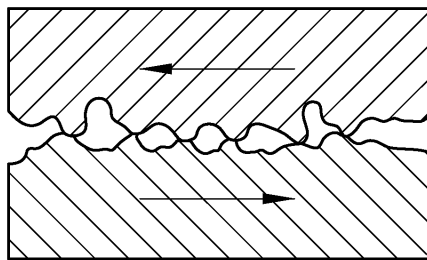
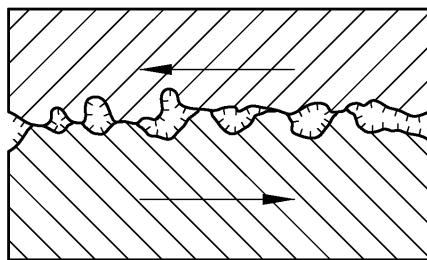


Рис. 4.4. Схема процесса прокатки полосы и направления действия сил трения

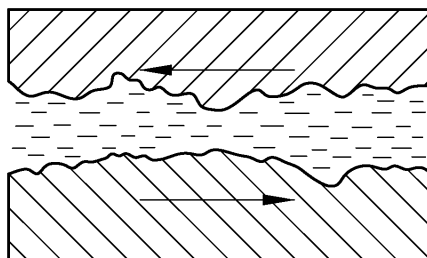
4.2. Виды трения



a



б



в

Рис. 4.5. Схематичное изображение различных видов трения

Трение обрабатываемого металла об инструмент происходит в присутствии и с участием третьих веществ. К ним относятся окислы обрабатываемого материала и инструмента, продукты истирания трущихся поверхностей, смазка и т.п.

Виды трения (режимы трения) определяются количеством и свойствами этих веществ, присутствующих на контактной поверхности, а также действующими на поверхности контакта нормальными напряжениями. Различают три вида трения: сухое, граничное и жидкостное (рис. 4.5).

Трение называют сухим, если поверхности обрабатываемого материала и инструмента находятся во взаимном контакте, свободны от третьих веществ и происходит относительное перемещение этих поверхностей в касательной к ним плоскости. В чистом виде такой вид трения при ОМД не встречается, поэтому на практике сухим трением называют трение несмазанных тел. Так, горячую прокатку проводят без смазки, поэтому трение при горячей прокатке условно называют су-

хим. Схематичное изображение его показано на рис. 4.5 а.

Трение называют граничным, если на поверхности трущихся тел адсорбированы вещества, существенно отличающиеся свойствами от материала инструмента и обрабатываемого тела и при этом имеет место механическое зацепление шероховатостей поверхностей контакта. Схема его приведена на рис. 4.5 б. Это наиболее часто встречающийся на практике вид трения. Он имеет место в случае применения смазок без обеспечения специальных условий, о которых речь пойдет ниже. Смазки, содержащие поверхностно-активные вещества, адсорбируются на трущихся поверхностях и образуют прочные пленки. Такие пленки способны выдерживать высокие нагрузки и оказывают малое сопротивление сдвигу этих поверхностей. Однако толщина смазки так мала, что шероховатости изделия и инструмента находятся во взаимном зацеплении.

Трение называют жидкостным, если между трущимися поверхностями имеется слой смазки, выводящий из механического зацепления шероховатости этих поверхностей (рис.4.6 в). Жидкостное трение - это внутреннее трение в объеме смазки. Оно нашло применение, например, при волочении проволоки. Ведутся работы по реализации этого вида трения в других процессах ОМД. Термин “жидкостное” трение условен, так как смазка может быть консистентной и даже твердой, например парафин. Главное, чтобы не происходило соприкосновение трущихся поверхностей, а сопротивление деформации самой смазки было во много раз меньше сопротивления деформации обрабатываемого металла.

В практических условиях ОМД как сухое, так и жидкостное трение в чистом виде встречается редко. Это объясняется тем, что, с одной стороны, на металлическую поверхность всегда попадают вещества, препятствующие возникновению сухого трения. С другой стороны, при наличии даже обильной смазки в процессе деформирования металла происходит выдавливание смазывающей пленки, а также разрушение и потеря ее физических свойств, что приводит к появлению контактирующих участков, свободных от смазывающего слоя. Поэтому на практике наблюдается преимущественно граничное трение.

4.3. Законы трения

Напряжение трения, являющееся одним из показателей, характеризующих условия трения на контакте, в общем случае оказывают влияние такие факторы, как состояние поверхностей инструмента и деформируемого тела, величина давления, скорость и температура деформации, наличие и способ подачи смазки и др.

Из-за сложности описания одновременного влияния на напряжение трения всех перечисленных факторов на практике используют упрощенные законы трения.

Согласно закону трения Амонтона-Кулона, напряжение трения τ пропорционально нормальному напряжению на поверхности контактирующих тел σ_n и не зависит от сопротивления деформации металла σ_s , т.е.

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n, \quad (4.1)$$

где μ - коэффициент трения, изменяющийся в пределах от 0,1 до 0,5.

В отношении выражения (4.1) необходимо сделать существенную оговорку. Дело в том, что по условию пластичности максимальная величина касательного напряжения τ_{\max} не может быть больше сопротивления деформации сдвига металла τ_s , т.е. $\tau \leq \tau_s$. Величина τ_s связана с величиной сопротивления деформации σ_s соотношением

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}.$$

Поэтому ряд ученых считают более целесообразным, особенно при горячей деформации, принимать трение независимым от нормальной нагрузки и выражать его в долях от величины τ_s . Этот закон получил название закона трения по Зибелю и формулируется так: напряжение трения τ пропорционально среднему по области пластической деформации сопротивлению деформации сдвига τ_s и не зависит от приложенного нормального напряжения σ_n , т.е.

$$\tau = \psi \tau_s, \quad (4.2)$$

где ψ , в отличие от кулоновского коэффициента трения, называют показателем трения, изменяющимся в пределах от 0,2 до 1.

Области применения того или иного закона трения наглядно иллюстрируется графической зависимостью, приведенной на рис.4.6, а также данными, приведенными в таблице 4.1.

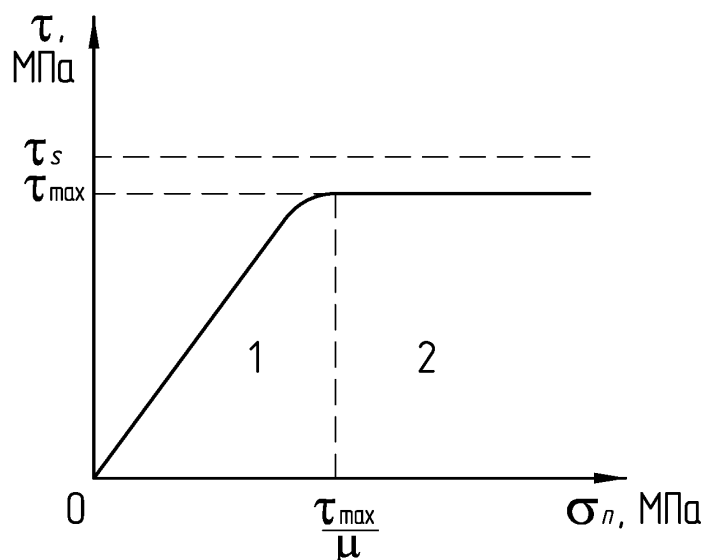


Рис. 4.6. Диаграмма, характеризующая области применения того или иного закона трения

Таблица 4.1

Факторы, отражающие области предпочтительного применения того или иного закона трения

Законы трения	Вид деформации (обработки)	Схема напряженного состояния	Величина степени деформации	Значение нормальных напряжений	Пример процесса ОМД
Амантона-Кулона $\tau = \mu\sigma_n$	холодная	сочетание сжимающих и растягивающих напряжений	при малых степенях деформации	при умеренных значениях	Листовая прокатка, листовая штамповка, волочение
Зибеля $\tau = \psi\tau_s$	горячая	с достаточно ярко выраженным всесторонним сжатием	при больших степенях деформации	при высоких значениях	прессование, объемная штамповка, ковка

4.4. Влияние различных факторов на коэффициент (показатель) трения

На величину показателя действующих на поверхности контакта элементарных сил трения оказывает влияние ряд факторов: состояние поверхности деформирующего инструмента, состояние поверхности и химический состав обрабатываемого металла, температура деформации, скорость

относительного скольжения металла по инструменту, наличие смазки на контактной поверхности и др.

Состояние рабочей поверхности инструмента определяется качеством обработки ее при изготовлении инструмента, а также степенью износа в процессе эксплуатации.

Чем выше качество обработки поверхности инструмента, тем меньше при прочих равных условиях коэффициент трения. Влияние обработки настолько значительно, что величина коэффициента трения различна в зависимости от направления скольжения металла по отношению к направлению обработки.

Вид обработки контактной поверхности деформируемого тела имеет значение лишь в начальный момент деформации. При ее дальнейшем развитии контактная поверхность деформируемого металла сглаживается и становится как бы отпечатком поверхности инструмента.

Чем больше твердость инструмента, тем ниже коэффициент трения. Так, например, при волочении проволоки наибольший коэффициент трения наблюдается при использовании стальных волок, меньший – твердосплавных и еще меньший – алмазных.

Влияние температуры обрабатываемого металла на коэффициент трения проявляется через изменение сопротивления деформации и физико-химических свойств окалины, образующей при нагреве промежуточный слой между металлом и инструментом. Установлено, что при повышении температуры коэффициент трения сначала растет, достигает максимального значения, а затем уменьшается. Такой характер зависимости можно объяснить тем, что сначала коэффициент трения растет в связи с окислением поверхности и образованием в этом интервале температур твердой окалины. При дальнейшем повышении температуры происходит размягчение окалины, и она начинает играть роль смазки, снижая коэффициент трения.

Коэффициент трения несколько снижается с увеличением относительной скорости скольжения металла по поверхности инструмента, т.е. с увеличением скорости деформирования. Чем больше скорость, тем меньше длительность контакта на площадках соприкосновения инструмента и деформируемого тела, а следовательно меньше роль молекулярного взаимодействия. В частности, коэффициент трения при обработке на молоте будет меньше, чем при обработке в сопоставимых условиях того же металла на прессе.

При обработке давлением широко применяют смазки, основное назначение которых – снижение коэффициента трения. Смазка образует промежуточный слой между деформируемым телом и инструментом, полностью или частично изолирующий их друг от друга. Для этого она должна иметь достаточную активность и вязкость.

4.5. Один из методов экспериментального определения показателей трения

Обычно для получения экспериментальной зависимости напряжения трения от нормального напряжения $\tau = f(\sigma_n)$ требуется создать однородное трение на достаточно большом участке контактной поверхности. Устройство, позволяющее это сделать называется трибометром (рис.4.7).

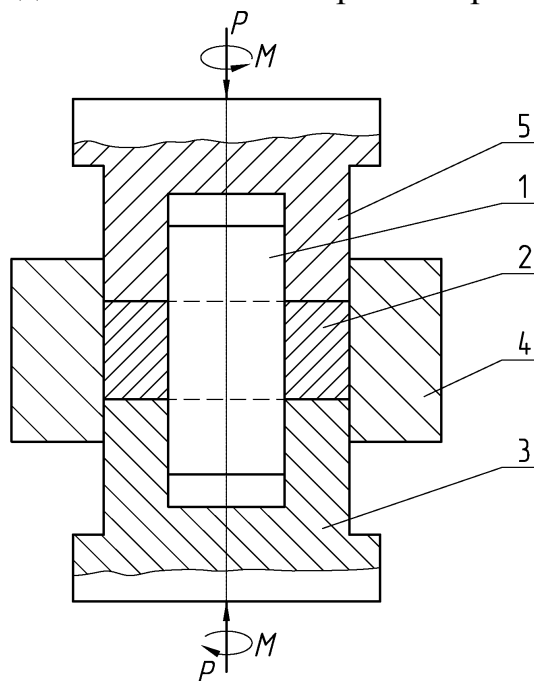


Рис. 4.7. Устройство для получения зависимости напряжения трения от нормального напряжения

Образец 2 устанавливают в полость, заключенную между кольцевыми пуансонами 3 и 5, обоймой 4 и цилиндрической вставкой 1. Далее образец с заданными внешним D и внутренним d диаметрами сжимают силой P и поворачивают пуансоны в разные стороны, фиксируя при этом момент сил трения M .

Напряжение трения τ и нормальное напряжение σ_n находят по формулам:

$$\tau = \frac{12 \cdot M}{\pi(D^3 - d^3)} \text{ и } \sigma_n = \frac{4 \cdot P}{\pi(D^2 - d^2)}$$

и строят зависимость $\tau = f(\sigma_n)$. Эксперименты возможны при различных шероховатости поверхности пуансонов, температуре нагрева образца и виде смазки.

5. ПЛАСТИЧНОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

5.1. Пластичность металлов и факторы, влияющие на нее

Пластичностью называют способность металла деформироваться при тех или иных значениях термомеханических параметров без разрушения в виде макроскопического нарушения сплошности.

Термомеханическими параметрами называют величины, определяющие термические и механические условия протекания пластической деформации. К числу таких параметров относят, в частности, температуру, составляющие тензоров напряжения и скорости деформации.

Мерой пластичности служит степень деформации сдвига, накопленная металлом к моменту разрушения λ_p .

В простейших испытаниях на растяжение и осадку цилиндрических образцов степень деформации сдвига находят по формулам (3.3) и (3.7). Если в эти формулы вместо значений текущей длины l и текущей высоты h подставить значения характерных размеров l^* и h^* , при которых на образцах наблюдается появление трещин (момент разрушения), то по формулам (3.3) и (3.7) можно уже рассчитать степень деформации сдвига в момент разрушения λ_p .

Остальные общеизвестные и широко применяемые на практике показатели пластичности, такие, как относительное удлинение и относительное сужение, определяемые с использованием формул (3.4), в принципе, легко можно пересчитать в показатель λ_p .

Кроме понятия “пластичность”, в теории ОМД используется понятие “деформируемость”, т.е. способность тела в целом изменять свою форму без макроскопического разрушения. Для решения вопроса о деформируемости следует проверить возможность разрушения металла в наиболее опасных местах изделия.

Основными факторами, влияющими на пластичность металлов при обработке давлением, являются: состав и структура деформируемого металла; реализуемая схема напряженного состояния; неравномерность деформации; температура деформации; скорость деформации; степень деформации; режим термической обработки.

Рассмотрим подробнее влияние каждого из них.

Состав и структура деформируемого металла

Обычно чем чище металл, тем выше его пластичность. Однако в чистом виде металлы для получения изделий почти не используются из-за невысоких прочностных свойств. Хром, никель, марганец, молибден, вольф-

рам и другие элементы, входящие в состав сталей и сплавов в качестве легирующих компонентов, на пластичность влияют по-разному. Решающее значение имеет количественный состав этих элементов, их соотношение в сплаве и т.д.

Более сильное влияние на пластичность металлов и сплавов оказывают компоненты, присутствующие в их составе как примеси. Это такие элементы, как олово, сурьма, свинец, сера, мышьяк, фосфор, а также газы: водород (гидриды), азот (нитриды), кислород (оксиды) и др. Они практически не растворяются в металлах и поэтому, располагаясь по границам зерен, ослабляют связь между ними. Температура плавления этих элементов и их соединений достаточно низкая, что при горячей деформации может привести к почти полной потере пластичности металла.

Неоднородная структура также снижает пластичность. При одинаковом химическом составе однофазный сплав будет пластичнее двухфазного, т.к. в последнем фазы имеют разные механические свойства и деформация протекает неравномерно. Металл с мелкозернистой структурой будет пластичнее металла с крупнозернистым строением, а деформированная заготовка во многих случаях оказывается пластичнее слитка, т.к. литая структура имеет резкую неоднородность зерен, включения и другие дефекты.

Схема напряженного состояния

В общем случае под схемой напряженного состояния понимают графическое представление о наличии и знаке главных нормальных напряжений, составляющих тензор напряжения

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix}. \quad (5.1)$$

Напомним, что нормальное напряжение считается положительным, если стремится вызвать растяжение тела, и отрицательным – если сжатие. При назначении индексов у главных нормальных напряжений используется правило: $\sigma_{11} \geq \sigma_{22} \geq \sigma_{33}$.

Показателями напряженного состояния называют составленные из инвариантов тензора напряжений безразмерные величины, от которых существенно зависит пластичность металлов.

В теории ОМД обычно используют два основных показателя напряженного состояния:

1. показатель схемы напряженного состояния

$$k = \frac{\sigma}{T}, \quad (5.2)$$

где $\sigma = \frac{1}{3} I_1(T_\sigma) = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ - среднее нормальное напряжение;

$T = \sqrt{I_2(D_\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2}$ - интенсивность касательных напряжений;

2. показатель формы девиатора напряжений или коэффициент Лоде:

$$\mu_\sigma = 2 \cdot \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{\sigma_{11} - \sigma_{33}} - 1. \quad (5.3)$$

Установлено, что при обработке давлением не существует металлов и сплавов, обладающих неизменными пластическими свойствами, а есть хрупкое и пластичное состояния, определяемые условиями нагружения при деформировании. При этом, чем в большей степени выражены в схеме напряженного состояния сжимающие напряжения, тем выше пластичность обрабатываемого металла.

Наиболее благоприятной для проявления металлом пластических свойств является схема всестороннего неравномерного сжатия. Появление в схеме растягивающих напряжений снижает пластичность, и самой низкой пластичностью характеризуется схема всестороннего растяжения, которая в реальных процессах обработки давлением практически не встречается. Более подробно влияние схемы напряженного состояния на пластичность металлов будет рассмотрено в отдельном параграфе.

Неравномерность деформации

Основными причинами, вызывающими неравномерное распределение напряжений и деформации в обрабатываемом теле, можно считать несоответствие конфигурации инструмента форме исходной заготовки, контактное трение, неоднородность физических свойств деформируемого тела.

В большинстве процессов обработки давлением форма заготовки (слитка) отличается от формы изделия, определяемой формой инструмента. Обычно форма заготовки проще формы изделия, что и приводит к неодинаковому обжатию отдельных частей заготовки, т.е. к неравномерной деформации.

Контактное трение затрудняет скольжение деформируемого тела по инструменту. Действие его распространяется неодинаково по объему тела, наиболее сильно проявляется вблизи контакта с инструментом и уменьшается по мере удаления от контакта, что приводит к неравномерности де-

формации. Примером может служить осадка цилиндрической заготовки в условиях максимального трения на контакте.

Неоднородность свойств может быть зональной (макроскопической), когда свойства одной части тела отличаются от другой, например, когда слиток (заготовка) нагрет неравномерно по сечению или деформируемое тело составлено из разных по свойствам металлов (биметалл), и может быть микроскопической, обусловленной неоднородностью или анизотропией свойств. В результате неоднородного распределения деформации в теле возникают взаимно уравновешенные дополнительные напряжения, которые не учитываются схемой напряженного состояния, вызываемого непосредственно воздействием внешних сил. Дополнительные напряжения могут при определенных условиях обработки изменять схему напряженного состояния, тем самым влияя на пластичность. Поэтому, например, при общей схеме всестороннего сжатия возможно появление в некоторых участках тела растягивающих напряжений, что приведет к более раннему его разрушению, чем прогнозируется.

Температура

При температурах обработки, близких к комнатной, металл имеет минимальную пластичность из-за низкой тепловой подвижности атомов. С другой стороны, при температурах, несколько меньших температуры плавления, наблюдается резкое снижение пластичности, являющееся результатом значительного роста зерен и последующего пережога (окисления границ зерен).

Общим положением для всех металлов и сплавов является то, что наибольшую пластичность они имеют при температурах, выше температуры начала рекристаллизации, т.е. в условиях горячего деформирования. Это является следствием не только увеличения подвижности атомов, но и роста пластичности межкристаллических прослоек, содержащих повышенное количество примесей.

Скорость деформации

Влияние скорости деформации при холодной обработке давлением значительно меньше, чем при горячей. Интенсивность роста этого влияния больше в диапазоне малых скоростей и незначительна в диапазоне больших скоростей.

Однако приведенные данные требуют уточнения. Надо учитывать прежде всего два существенных обстоятельства: наличие при горячем деформировании двух противоположных процессов – упрочняющего и разупрочняющего, а также тепловой эффект пластической деформации. Последний выражается в том, что энергия, расходуемая на пластическую де-

формацию, превращается в основном в теплоту. Коэффициент выхода теплоты составляет для чистых металлов 0,85-0,90, для сплавов 0,75-0,85.

Общим в оценке влияния скорости деформации на пластичность является то, что если повышение скорости деформации затрудняет разупрочняющие процессы в металле во время деформации, то это снижает пластичность.

Степень деформации

При холодной обработке давлением с увеличением степени деформации возрастает плотность дислокаций, затрудняется их перемещение, блокируются источники дислокаций и пластичность падает.

При горячей обработке степень деформации влияет слабее, так как при повышении температуры активизируются диффузионные процессы, сопровождающиеся возвратом или рекристаллизацией, приводящими к частичному или полному восстановлению пластичности.

Режим термической обработки

Для получения изделий обработкой давлением требуется определенная степень деформации. Чаще всего достижение такой степени деформации за одну операцию (один проход при прокатке, одна операция вытяжки при листовой штамповке и т.д.) трудноосуществимо или невозможно. Поэтому технологический процесс обычно включает несколько операций. Для частичного или полного восстановления пластичности после одного из этапов обработки давлением проводят промежуточную термообработку.

5.2. Основы расчета предельных деформаций при ОМД

Разрушение при больших пластических деформациях можно условно разделить на две стадии. По мере развития деформации на первой стадии образуются и растут зародыши трещин, начинают все сильнее действовать эффекты концентрации напряжений. Однако до некоторых пор трещины остаются достаточно устойчивыми и для их дальнейшего развития необходимы дополнительные пластические деформации. Вторая стадия начинается с момента, когда трещина достигает критического размера и теряет устойчивость, далее разрушение идет самопроизвольно и лавинообразно без заметных макродеформаций.

Исходя из приведенных ранее определений, условие деформирования без разрушения можно сформулировать следующим образом: до тех пор, пока накопленная частицей степень деформации сдвига λ не достигнет предельной величины λ_p , разрушения не произойдет. Аналитически это выражается в виде

$$\lambda < \lambda_p, \text{ или } \psi = \frac{\lambda}{\lambda_p} < 1. \quad (5.4)$$

Величину ψ называют степенью использования запаса пластичности. В момент разрушения $\psi = 1$.

Выражение (5.4) справедливо для случая, когда материал деформируется в условиях постоянства термомеханических параметров, от которых зависит λ_p .

В случае, когда тело обладает неоднородным напряженным и деформированным состояниями в пространстве и во времени, условие пластического деформирования материала без разрушения следует принять в виде

$$\psi = \int_0^t \left\{ \frac{H(\tau)}{\lambda_p [k(\tau), \mu_\sigma(\tau)]} \right\} d\tau < 1, \quad (5.5)$$

где интеграл подсчитывается для отдельной частицы деформируемого тела вдоль траектории ее движения; $H(\tau)$, $k(\tau)$, $\mu_\sigma(\tau)$ – результаты решения краевой задачи, характеризующие изменение интенсивности скоростей деформации сдвига и показателей напряженного состояния во времени; $\lambda_p(k, \mu_\sigma)$ – известная из предварительно проведенных экспериментов функция, связывающая показатель пластичности металла с термомеханическими параметрами.

Условия (5.4) и (5.5) во всех случаях существенно немонотонного деформирования дают завышенные расчетные значения ψ , т.е. разрушение металла происходит при больших деформациях, чем предсказывают эти условия.

Это объясняется тем, что параллельно с процессом возникновения и увеличения микродефектов (трещин) в пластически обрабатываемом теле при немонотонном деформировании идут процессы “залечивания” зачатков нарушения сплошности и торможения их развития. Соприкосновение поверхностей трещины в условиях сжатия и их относительного перемещения вследствие пластической деформации может вызвать схватывание (сварку).

Распространим условие деформирования без разрушения на существенно немонотонные процессы деформации.

Для этого вся деформация моментами смены ее направления может быть разделена (дискретизирована) на этапы, деформация в которых будет близка к монотонной.

Общая степень использования запаса пластичности рассчитывается по формуле

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \Psi_i^{a_i}, \quad (5.6)$$

где n – число этапов знакопостоянной деформации; $a_i \geq 1$ – показатель, характеризующий интенсивность пластического разрыхления металла в процессе деформирования.

Ψ_i – степень использования запаса пластичности на i -ом этапе деформирования, рассчитываемая по одной из формул (5.4) или (5.5).

Общий вид условия деформирования без разрушения остается без изменения

$$\Psi < 1.$$

А разрушению, как и прежде, соответствует значение

$$\Psi = 1.$$

5.3. Методы экспериментального определения пластических характеристик металла и оформление полученных результатов в виде диаграммы пластичности

Для того, чтобы сделать оценку вероятности разрушения какого-то конкретного металла по одному из приведенных выше выражений (5.4)÷(5.6), необходимо предварительно определить характеристики пластических свойств металлов в зависимости от показателей напряженного состояния k и μ_σ , т.е. иметь зависимость $\lambda_p = \lambda_p(k, \mu_\sigma)$. Для ее построения проводятся эксперименты по кручению, растяжению и сжатию цилиндрических образцов, помещенных в специальную камеру, заполненную жидкостью под высоким давлением.

Опишем методику испытаний на кручение цилиндрических образцов в камере, заполненной жидкостью высокого давления (рис. 5.1).

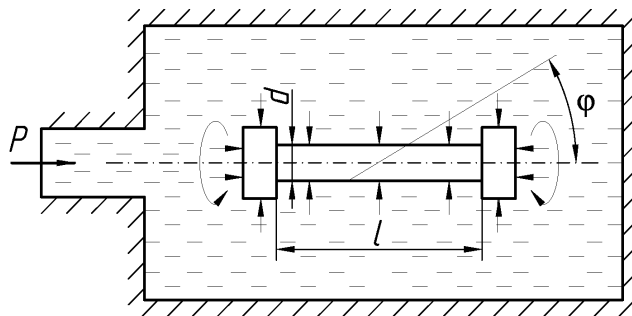


Рис. 5.1. Схема испытания для определения пластических свойств металлов кручением образцов в камере высокого давления

Степень деформации сдвига на поверхности образца

$$\lambda = \operatorname{tg} \varphi,$$

где φ - угол наклона риски, нанесенной до испытания вдоль образующей, занимающей после деформации положение винтовой линии.

Для того, чтобы определить λ_p при кручении, достаточно в месте разрушения (оно во всех случаях начинается на поверхности образца) измерить угол φ_p и подсчитать $\lambda_p = \operatorname{tg} \varphi_p$.

Определим показатели напряженного состояния. При кручении при атмосферном давлении $\sigma_{11} = \tau_s$; $\sigma_{22} = 0$; $\sigma_{33} = -\tau_s$.

Давление жидкости g в одинаковой мере изменяет главные нормальные напряжения: $\sigma_{11} = \tau_s - g$; $\sigma_{22} = -g$; $\sigma_{33} = -\tau_s - g$.

Как следует из формул (5.2) и (5.3),

$$k = \frac{\sigma}{T} = \frac{1/3(\tau_s - g - g - \tau_s - g)}{\tau_s} = -\frac{g}{\tau_s};$$

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{\sigma_{11} - \sigma_{33}} - 1 = 2 \frac{-g + \tau_s + g}{\tau_s - g + \tau_s + g} - 1 = 0.$$

В простейшем случае постоянным в опыте поддерживают g . Зная $\tau_s = \tau_{s0}$ перед испытанием и определяя $\tau_s = \tau_s(\lambda)$ по кривой упрочнения к моменту разрушения, можно найти средний за опыт показатель $k_{\text{ср}} = \frac{(-g/\tau_{s0} - g/\tau_s)}{2}$, соответствующий конкретному значению давления жидкости g . В результате на график наносят точку с координатами λ_p и $k_{\text{ср}}$.

Меняя от опыта к опыту давление жидкости g , или, другими словами, показатель k , и определяя каждый раз величину λ_p можно получить серию точек, соответствующую зависимости $\lambda_p = f(k)$ при $\mu_\sigma = 0$. Записывается это в виде: $\lambda_p = \lambda_p(k) \Big|_{\mu_\sigma=0}$.

Аналогичные рассуждения можно провести и для испытаний на растяжение и сжатие образцов в камере высокого давления, по результатам которых строят, соответственно, зависимости $\lambda_p = \lambda_p(k) \Big|_{\mu_\sigma=-1}$ и $\lambda_p = \lambda_p(k) \Big|_{\mu_\sigma=1}$.

Таким образом, в результате всех проведенных испытаний для одного металла или сплава имеем набор линий, в совокупности отражающих общую зависимость показателя пластичности этого металла от показателей напряженного состояния.

Графическое изображение функциональной зависимости $\lambda_p = \lambda_p(k, \mu_\sigma)$ называют диаграммой пластичности. На рис. 5.2 показан характерный вид диаграммы пластичности, свойственный большинству обрабатываемых давлением металлов и сплавов.

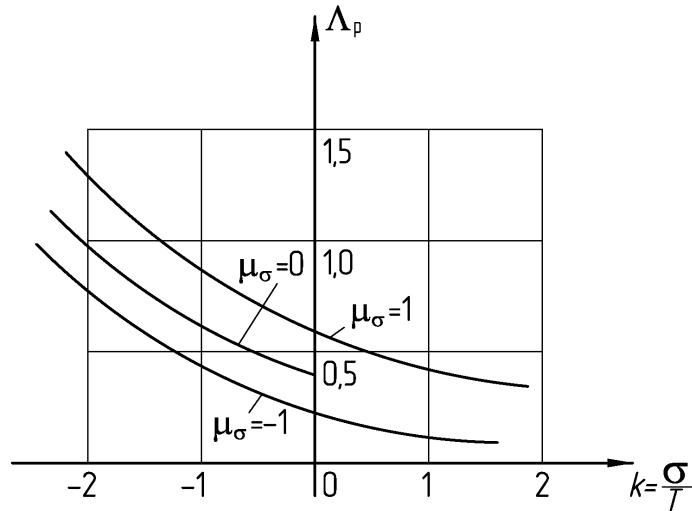


Рис. 5.2. Характерный вид диаграммы пластичности

Анализируя графики (рис. 5.2), можно сделать следующие выводы:

1. Зависимость $\lambda_p = \lambda_p(k)$ при $\mu_\sigma = \text{const}$ всегда убывающая. Она показывает, что рост сжимающих напряжений всегда повышает пластичность металла при прочих равных условиях.
2. Однозначной зависимости λ_p от μ_σ при $k = \text{const}$ нет. Одни металлы с ростом μ_σ повышают пластичность, другие нет, третьим свойственно повышение λ_p с ростом μ_σ лишь в условиях существенных сжимающих напряжений, а при больших значениях k эта зависимость обратная. Другими словами, последовательность расположения линий на диаграмме пластичности для тех или иных значений μ_σ может быть произвольной.
3. Относительная пластичность, определенная при каких-то значениях показателей напряженного состояния, не может характеризовать пластичность этого же металла в условиях с существенно отличным напряженным состоянием, т.е. с иными показателями k и μ_σ .

Например, служащая в качестве показателя пластичности величина относительного удлинения $\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%$ характеризует пластичность металла лишь при значениях показателей напряженного состояния $k=0,58$ и $\mu_\sigma = -1$ (одна точка на диаграмме пластичности). Правда, значение δ позволяет сделать в некоторых случаях качественную оценку измерения λ_p при других значениях показателя k .

Например, нетрудно показать, что

$$\lambda_P \Big|_{\substack{k=0,58 \\ \mu_\sigma=-1}} = \sqrt{3} \cdot \ln \left(\frac{\delta}{100\%} + 1 \right).$$

Тогда при $k > 0,58$ $\lambda_P < \lambda_P \Big|_{k=0,58}$,

а при $k < 0,58$ $\lambda_P > \lambda_P \Big|_{k=0,58}$ (при одинаковом $\mu_\sigma = -1$).

4. По-видимому, для некоторых металлов и сплавов существуют такие значения показателей напряженного состояния k и μ_σ , при которых, в одном случае $\lambda_P \rightarrow 0$ т.е. будет происходить переход металла из пластического состояния в хрупкое, а в другом случае $\lambda_P \rightarrow \infty$, т.е. металл будет приобретать свойства неограниченной пластичности или сверхпластичности.

5.4. Модель восстановления запаса пластичности при отжиге холоднодеформированных изделий

Как уже упоминалось ранее, холодную деформацию листа, труб, проволоки и т.п. часто осуществляют в несколько переходов, которые во многих случаях сопровождаются проведением промежуточных и окончательных отжигов. При отжиге идут процессы разупрочнения металла и восстановления его пластических свойств, причем природа этих процессов разная. В основе восстановления пластичности лежат диффузионные процессы переноса вещества в поры и микротрещины.

Дадим математическое описание того, как происходит восстановление запаса пластичности при отжиге. Для решения этой задачи может быть использована следующая методика.

Эксперимент осуществляют с металлом, пластичность которого $\lambda_P = \lambda_P(k, \mu_\sigma)$ достаточно изучена. Образцы опытной партии подвергают пластической деформации на различную степень использования запаса пластичности $\psi_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_P}$, но не до разрыва. Затем все образцы подвергают отжигу

по избранным температуре Θ и времени выдержки t . При отжиге произойдет восстановление пластичности образцов на величину $\Delta\psi$. После отжига все образцы вновь подвергают пластической деформации, но уже до разрушения. При этом фиксируют λ_2 и вычисляют $\psi_2 = \lambda_2 / \lambda_P$. Вторая пластическая деформация играет вспомогательную роль для определения $\Delta\psi$.

В итоге имеем (деформация в опытах близка к монотонной, образцы вторым деформированием доведены до разрушения)

$$\psi = \psi_1 - \Delta\psi + \psi_2 = 1,$$

а это позволяет найти

$$\Delta\psi = -1 + \psi_1 + \psi_2. \quad (5.7)$$

В абсолютном виде выражение (5.7) можно записать следующим образом

$$|\Delta\psi| = 1 - \psi_1 - \psi_2.$$

Результаты экспериментов по определению восстановления запаса пластичности $\Delta\psi$ при отжиге, проведенных для некоторых сталей и сплавов, показали, что восстановление пластичности в значительной степени зависит от ψ_1 , т.е. от величины деформации λ до проведения отжига. Диаграмма (рис.5.3) характеризует стадии накопления поврежденности при деформации и возможности ее уменьшения при последующей термической обработке. Она имеет три характерных участка: $[0 \dots \psi^*]$, $[\psi^* \dots \psi^{**}]$, $[\psi^{**} \dots 1]$.

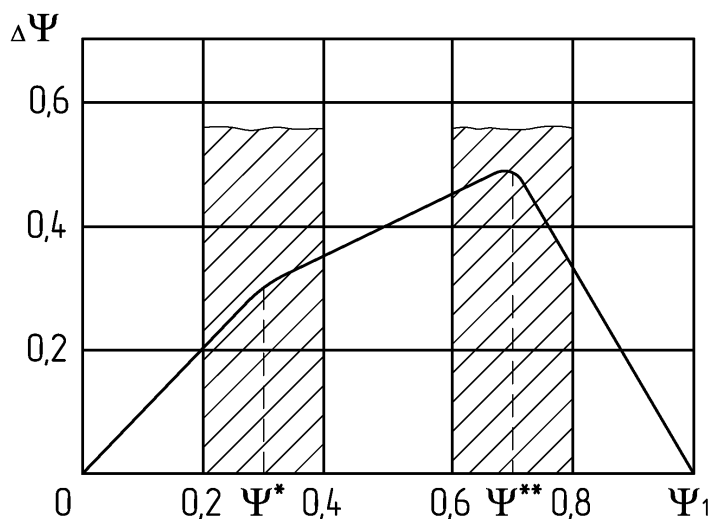


Рис. 5.3. Диаграмма, характеризующая стадии накопления поврежденности при деформации и возможности ее уменьшения при последующей термообработке

Термическая обработка после пластической деформации с величиной $\psi \leq \psi^*$ полностью устраняет накопленную за процесс деформации поврежденность микродефектами ($\Delta\psi = \psi_1$).

Условие $\psi^* \leq \psi \leq \psi^{**}$ соответствует образованию в металле энергетически устойчивых микропор, не залечиваемых полностью при отжиге по принятому режиму ($\Delta\psi < \psi_1$).

После деформации с $\psi > \psi^{**}$ возможность устранения поврежденности микродефектами при отжиге уменьшается, а при достижении $\psi = 1$ происходит макроразрушение металла.

Штриховкой показаны области изменения величин ψ^* и ψ^{**} для различных металлов.

Наличие микродефектов сплошности металла в некоторых изделиях не всегда приводит к снижению эксплуатационных характеристик. Поэтому при проектировании технологии ОМД следует применять дифференцированный подход к назначению деформаций и отжигов и учитывать условия эксплуатации изделий.

Кроме того, известно, что микроскопические нарушения сплошности могут самопроизвольно развиваться после прекращения пластической деформации. Это происходит, если материал получил при обработке высокое значение ψ и если в металле имеют место значительные остаточные напряжения.

Система ограничений по величине ψ может быть такой:

1. < 1 – допускается для изделий, не несущих значительных нагрузок;
2. $\leq \psi^{**} = 0,6 \dots 0,8$ – для большинства выпускаемых изделий, у которых существуют ограничения по нижнему пределу прочности, вязкости и долговечности;
3. $\leq \psi^* = 0,2 \dots 0,4$ – для изделий, работающих в особенно неблагоприятных условиях.

Последнее неравенство можно охарактеризовать как условие получения продукции без микродефектов сплошности деформационного происхождения.

6. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО ТЕОРИИ ОМД

Для закрепления и одновременно контроля знаний, полученных студентами в процессе изучения теории обработки металлов давлением, учебным планом предусмотрено выполнение курсовой работы. Тематика задач, входящих в нее, охватывает основные разделы курса и содержит 25 вариантов контрольных заданий. Ниже приведены формулировки задач и числовые данные по каждой из них. Оформление курсовой работы производится в соответствии с СТО 4.2-07-2010.

Задача 1. Исходная прямоугольная координатная сетка размерами $a_0 \times b_0$, нанесенная на плоскость разъема деформируемой заготовки, в процессе деформации искажается и принимает форму параллелограмма с размерами сторон c и d и углом между ними γ . Определить значение логарифмических деформаций в направлении осей координат x и y и подсчитать степень деформации сдвига λ для рассмотренного случая плоского деформированного состояния.

Таблица 6.1
Данные к задаче 1

Вариант	a_0 , мм	b_0 , мм	c , мм	d , мм	γ , град
1	10	10	12	8	80
2	10	8	14	6	76
3	10	6	8	9	82
4	10	4	6	8	64
5	8	8	12	5	72
6	8	6	10	4	60
7	8	4	6	7	76
8	6	6	9	3	82
9	6	4	10	3	67
10	4	4	7	2	73
11	10	10	14	6	70
12	10	8	12	5	69
13	10	6	13	4	75
14	10	4	7	7	59
15	8	8	11	5	65
16	8	6	5	9	74
17	8	4	10	3	80
18	6	6	9	4	69
19	6	4	4	7	77
20	4	4	7	2	6
21	10	10	6	12	75
22	10	8	8	10	78
23	8	8	10	6	69
24	8	6	6	9	72
25	6	6	8	5	66

Задача 2. Цилиндрическая заготовка диаметром d_0 и высотой h_0 осаживается в условиях действия минимальных сил трения. Усилие, необходимое для перевода тела в пластическое состояние, составляет P_0 . В промежуточный момент времени, когда высота заготовки уменьшается до h_1 , усилие равно P_1 , а в конце осадки, на высоте h_k , достигает величины P_k . Определить сопротивление деформации в начале, в середине и в конце испытания. Используя полученные данные, найти значения коэффициентов a и b , входящих в описывающее поведение материала уравнение аппроксимации

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + a\lambda^b,$$

где $\lambda = \sqrt{3} \ln \frac{h_0}{h_i}$ – степень деформации сдвига; h_i – текущая высота образца.

Таблица 6.2
Данные к задаче 2

Вариант	d_0 , мм	b_0 , мм	P_0 , кН	h_1 , мм	P_1 , кН	h_k , мм	P_k , кН
1	100	80	200	70	280	60	350
2	90	70	180	45	300	30	480
3	80	60	120	55	160	50	190
4	95	60	140	50	190	40	250
5	85	65	150	50	220	30	390
6	70	50	80	40	120	30	180
7	60	40	110	25	200	15	370
8	75	50	90	35	140	20	270
9	65	40	100	30	160	20	260
10	50	30	40	20	90	15	130
11	100	70	160	60	230	50	310
12	90	60	140	55	190	45	260
13	80	50	100	45	170	40	220
14	50	70	140	50	320	40	470
15	85	60	120	40	220	25	380
16	70	40	100	25	200	15	370
17	60	45	90	35	150	20	280
18	75	60	80	50	140	30	260
19	65	50	70	40	110	25	190
20	50	40	40	35	60	25	90
21	100	60	140	50	210	40	290
22	90	50	160	40	220	30	330
23	80	40	120	35	180	30	240
24	50	60	130	55	200	45	270
25	85	50	120	45	190	35	280

Задача 3. Образцы с исходной площадью поперечного сечения F_0 подвергаются деформации вида, приведенного в таблице. В первом случае испытание производится при атмосферном давлении ($g_I = 0$), в двух других – под воздействием всестороннего давления жидкости, соответственно, g_{II} и g_{III} . Разрушение образцов происходит в момент, когда напряжение достигает заданной величины $\sigma_p = \sigma_s$, при этом площадь поперечного сечения составляет, соответственно, F_I , F_{II} и F_{III} . Определить значения показателей напряженного состояния k и μ_σ в момент разрушения и построить диаграмму пластичности $\lambda_p = \lambda_p(k)$.

Таблица 6.3
Данные к задаче 3

Вариант	Вид деформации	$F_0, \text{мм}^2$	$F_I, \text{мм}^2$	$F_{II}, \text{мм}^2$	$g_{II}, \text{МПа}$	$F_{III}, \text{мм}^2$	$g_{III}, \text{МПа}$	$\sigma_s, \text{МПа}$
1	Сжатие	1200	1420	2150	20	2830	40	32
2	Растяжение	50	46	33	15	22	30	46
3	Сжатие	800	1130	1970	10	2480	30	38
4	Растяжение	24	21	16	30	12	50	22
5	Сжатие	460	670	890	20	1110	40	54
6	Растяжение	32	28	23	15	16	30	26
7	Сжатие	320	440	590	25	780	50	44
8	Растяжение	40	35	28	10	18	25	62
9	Сжатие	640	780	1270	30	1960	45	36
10	Растяжение	28	23	17	15	12	30	24
11	Сжатие	1000	1230	1940	25	2640	35	46
12	Растяжение	48	40	32	10	22	25	18
13	Сжатие	860	1050	1470	20	2130	45	32
14	Растяжение	36	30	20	30	14	50	54
15	Сжатие	680	930	1540	15	2050	30	20
16	Растяжение	30	27	22	10	14	25	28
17	Сжатие	720	890	1510	25	1990	40	76
18	Растяжение	46	39	28	20	20	35	42
19	Сжатие	380	450	680	30	780	45	48
20	Растяжение	20	18	14	15	12	25	34
21	Сжатие	540	680	830	10	1210	20	42
22	Растяжение	38	32	28	15	22	25	36
23	Сжатие	820	1030	1320	20	1840	30	28
24	Растяжение	42	36	30	10	24	25	34
25	Сжатие	480	630	960	25	1320	40	22

Задача 4. Цилиндрический образец размерами h_0 и d_0 подвергается до момента разрушения двухступенчатой деформации с промежуточным отжигом. После первого этапа деформирования диаметр образца составляет d_1 , а в момент разрушения – d_2 . При отжиге происходит восстановление запаса пластичности на величину $\Delta\psi$, изменение размеров образца при этом не наблюдается, Испытания осуществляются при атмосферном давлении, однородность деформации не нарушается. Определить показатель пластичности материала λ_p .

Таблица 6.4
Данные к задаче 4

Вариант	Вид деформации	h_0 , мм	d_0 , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	$\Delta\psi$
1	Растяжение	50	8	7,2	6,2	0,25
2	Сжатие	42	64	72,0	86,0	0,15
3	Растяжение	78	12	9,8	8,4	0,33
4	Сжатие	40	56	66,0	78,0	0,25
5	Растяжение	56	8	7,2	5,6	0,10
6	Сжатие	36	44	52,0	60,0	0,15
7	Растяжение	48	6	5,7	4,8	0,30
8	Сжатие	44	58	66,0	82,0	0,25
9	Растяжение	62	10	9,2	7,6	0,40
10	Сжатие	50	76	88,0	102,0	0,10
11	Растяжение	60	8	6,9	5,2	0,25
12	Сжатие	38	62	70,0	82,0	0,15
13	Растяжение	68	12	11,2	9,4	0,30
14	Сжатие	42	56	68,0	76,0	0,25
15	Сжатие	72	10	9,2	8,1	0,10
16	Сжатие	46	62	68,0	86,0	0,15
17	Растяжение	54	8	6,8	5,9	0,20
18	Сжатие	40	60	78,0	84,0	0,20
19	Растяжение	66	10	8,9	8,2	0,30
20	Сжатие	58	76	88,0	100,0	0,15
21	Растяжение	56	8	7,2	6,0	0,15
22	Сжатие	32	48	56,0	70,0	0,10
23	Растяжение	62	10	8,6	7,4	0,20
24	Сжатие	48	64	82,0	92,0	0,25
25	Растяжение	74	12	10,2	8,6	0,15

Задача 5. Выбрав предварительно расположение осей координат, составить дифференциальное уравнение равновесия для случая осадки бруса размерами: высота h , ширина b и длина l . Известно, что условия трения на контакте описываются законом Зибеля и в процессе деформирования не происходит изменения размеров по длине. Решив его совместно с условием пластичности, записанным в виде $\sigma_{yy} - \sigma_{xx} = 1,15\sigma_s$, построить эпюру распределения напряжений σ_{yy} на контакте заготовки с инструментом. Определить усилие осадки, воспользовавшись для этой цели формулой

$$P = \iint \sigma_{xx} dx dz .$$

Таблица 6.5
Данные к задаче 5

Вариант	h , мм	b , мм	l , мм	σ_s , МПа	m
1	60	116	280	60	0,35
2	46	110	240	50	0,45
3	54	102	260	40	0,50
4	50	98	250	70	0,40
5	42	86	310	80	0,25
6	56	104	290	60	0,40
7	48	100	250	50	0,35
8	58	116	300	70	0,20
9	40	82	280	40	0,25
10	38	78	200	60	0,40
11	52	90	270	50	0,35
12	46	92	320	80	0,20
13	44	88	200	50	0,25
14	36	76	280	40	0,15
15	42	84	260	70	0,35
16	60	112	360	60	0,40
17	46	106	230	50	0,25
18	36	82	270	40	0,15
19	54	94	320	60	0,20
20	50	114	280	70	0,30
21	42	84	240	50	0,25
22	54	90	280	40	0,15
23	50	104	320	60	0,30
24	48	100	290	70	0,20
25	38	88	240	40	0,25

Задача 6. Используя данные предыдущей задачи, определить усилие осадки бруса P методом баланса мощностей и сравнить результат с полученным в задаче 5. Поле скоростей перемещения частиц принять в виде

$$v_y = -v \cdot \frac{y}{h}; \quad v_z = 0; \quad v_x = ?$$

где v – скорость перемещения бойка; y – текущая ордината, изменяющаяся от 0 до h .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях экономической и хозяйственной самостоятельности предприятий образованность, компетентность и профессионализм – важнейшие качества современного специалиста, которые позволяют ему мыслить самостоятельно, творчески, свободно ориентироваться в непрерывно возникающих проблемах производства и принимать грамотные технические решения. Как бы ни был высок уровень читаемых преподавателем лекций, совершенна методика обучения, качество подготовки специалиста в значительной степени зависит и от самостоятельной работы студента. В данном конспекте лекции представлен материал, позволяющий сформировать основы теоретической базы знаний будущих специалистов в области обработки металлов давлением.

Он содержит лишь минимум информации, охватывающей основные аспекты учения о пластической деформации, как основы реализации любого процесса ОМД.

Приоритетное развитие обработки металлов давлением объясняется высокой производительностью ее основных процессов, улучшением свойств и структуры, качества поверхности и точности размеров изделия после пластической реформации. Не менее важным является ресурсосберегающий характер способов обработки давлением, т. е. значительное сокращение потерь металла в процессе производства по сравнению с другими видами обработки металлов.

Естественно, что решение вопросов, возникающих перед специалистом, должно производиться в соответствии с возможностями, которыми он располагает. Поэтому специалист должен наряду с теоретическими методами владеть навыками практического решения задач, в связи с чем конспект лекции дополнен вариантами заданий для выполнения курсовой работы по «Теории ОМД», которая является завершающим звеном освоения студентами указанной дисциплины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета – УПИ, 2001.
2. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977.
3. Суяров, Д.И. Физико-механические основы расчетов параметров пластической обработки металлов / Д.И. Суяров, Ю.А. Горбунов. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1984.
4. Мастеров, В.А. Теория пластической деформации и обработка металлов давлением / В.А. Мастеров, В.С. Берковский. – М.: Металлургия, 1989.
5. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980.
6. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Г.Я. Гун, А.М. Галкин. М.: Металлургия, 1988.
7. Загиров, Н.Н. Теоретические основы пластической деформации: Учеб. пособие / Н.Н. Загиров. – Красноярск: ГАЦМиЗ, 1998.
8. Загиров, Н.Н. Основные положения теории пластичности: Учеб. пособие / Н.Н. Загиров. – Красноярск: ГАЦМиЗ, 1997.

Учебное издание

Загиров Николай Наильич
Рудницкий Эдвард Анатольевич

Теория обработки металлов давлением

Конспект лекций и варианты заданий
для выполнения курсовой работы