

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Цель работы

Освоить методику обработки индикаторной диаграммы, получить навыки определения сопротивления деформации при одноосном и сложном напряженном состоянии.

Овладеть навыками анализа простейших реологических моделей и научиться определять возможность их использования для различных целей.

Теоретическое введение

Сопротивление деформации σ_s при одноосном растяжении (или сжатии)- напряжение пластического течения при известных термомеханических режимах деформирования, заданных температурой t , $^{\circ}\text{C}$, величиной деформации ε , со скоростью деформации ζ . Сопротивление деформации зависит также от химического состава и структуры сплава, гидростатического давления или среднего напряжения при $\sigma > 2000 \dots 5000$ МПа развития деформации во времени, геометрического фактора и внешней среды.

Сопротивление деформации T_s при сложном напряженном состоянии можно вычислить, используя условие текучести Мизеса-Сен-Венана

$$T_s = \sqrt{3} / \sigma_s /$$

Величина σ_s определяется экспериментально на специальных испытательных машинах- пластомерах, обеспечивающих постоянство скорости деформации в процессе деформирования и их достаточно высокий уровень ($\xi = 100 \dots 200 \text{ c}^{-1}$), характерный для большинства высокоскоростных процессов ОМД.

Способы представления результатов пластометрических испытаний для сплавов заданного состава и структуры различны: в виде диаграммы $\sigma_s = \sigma_1(\varepsilon, \xi, t)$ (рисунки 1.1, 1.2.) а также таблиц или уравнений, получаемых аппроксимацией экспериментальных данных. Влияние различных факторов на величину σ_s может быть учтено с помощью термомеханических коэффициентов, учитывающих влияние степени деформации n_ε , скорости деформации n_ξ и температуры n_t по формуле

$$\sigma_s = \sigma_T * n_\epsilon * n_\xi * n_t \quad \text{или} \quad \sigma_s = \sigma_{s,\delta} * n_\epsilon, \quad (1.1)$$

где σ_T - предел текучести при статических испытаниях и контактной температуре, т. е. величина, регламентированная ГОСТом;

$\sigma_{s,\delta}$ - базовое сопротивление деформации при заданных t , °С, и ξ (рисунок - 1.2).

Термомеханические коэффициенты могут быть представлены в виде графиков (рисунок 1.2) или формулами.

Величина сопротивления деформации при статических испытаниях ($\xi < 10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) и комнатной температуре для выбранного сплава зависит от степени деформации и может быть определена по истинной диаграмме растяжения. Для этого индикаторную диаграмму (рисунок 1.3.) в координатах усилие - удлинение обрабатывают, получая истинную диаграмму σ_s - ϵ (ϵ -логарифмическая деформация). Обработка Р- Δl диаграмм состоит из последовательности следующих операций.

1) Линейный участок АЕ упругого деформирования (область 1, рисунок 1.3) продолжает до пересечения с осью абсцисс в точке 0, исключая нелинейный участок АО, получаемый в результате выборки люфтов и зазоров в захватах, ходовом винте и других их деталей испытательной машины.

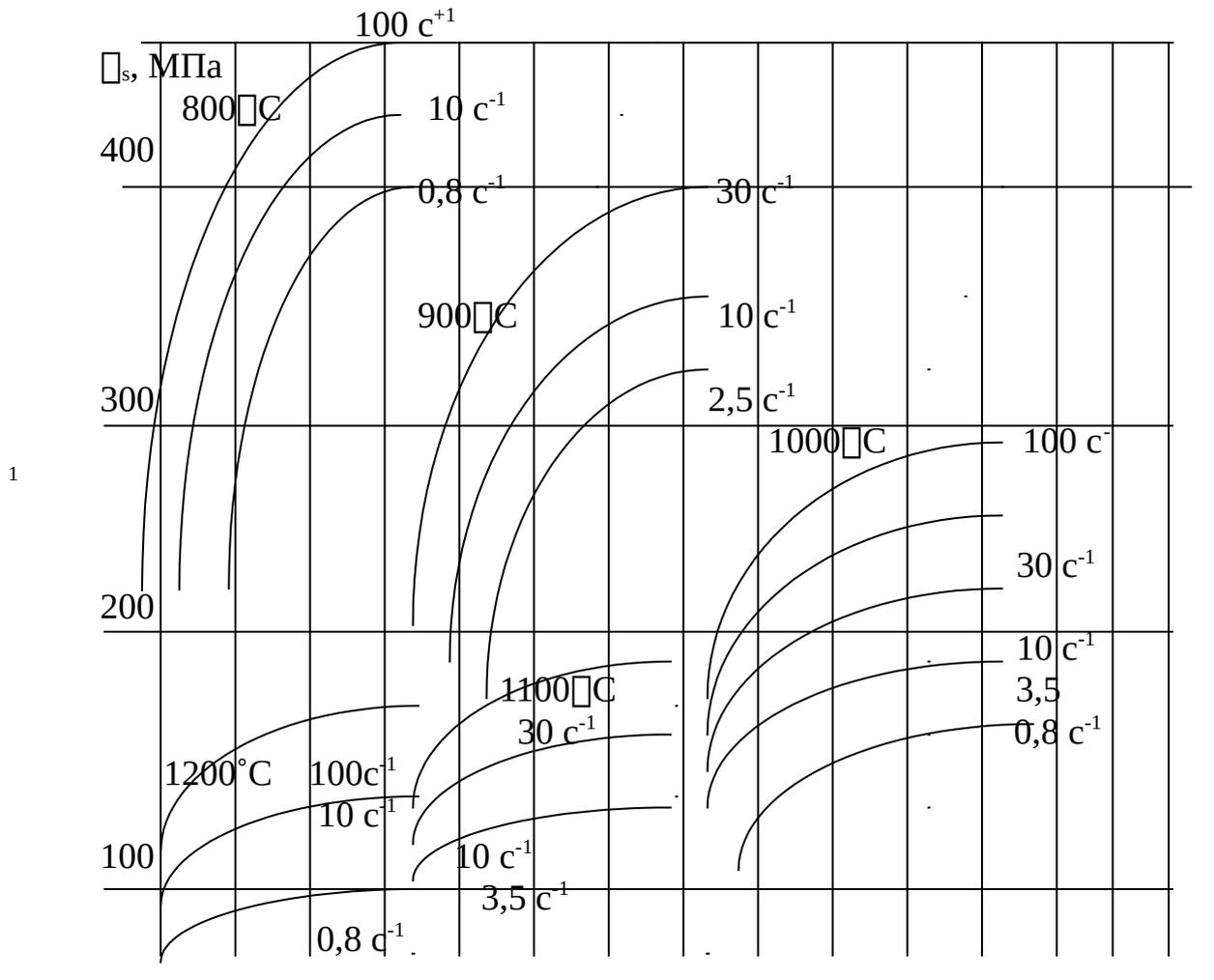


Рисунок 1.1 - Кривые сопротивления деформации стали 08X17 при различных t^0 и ξ

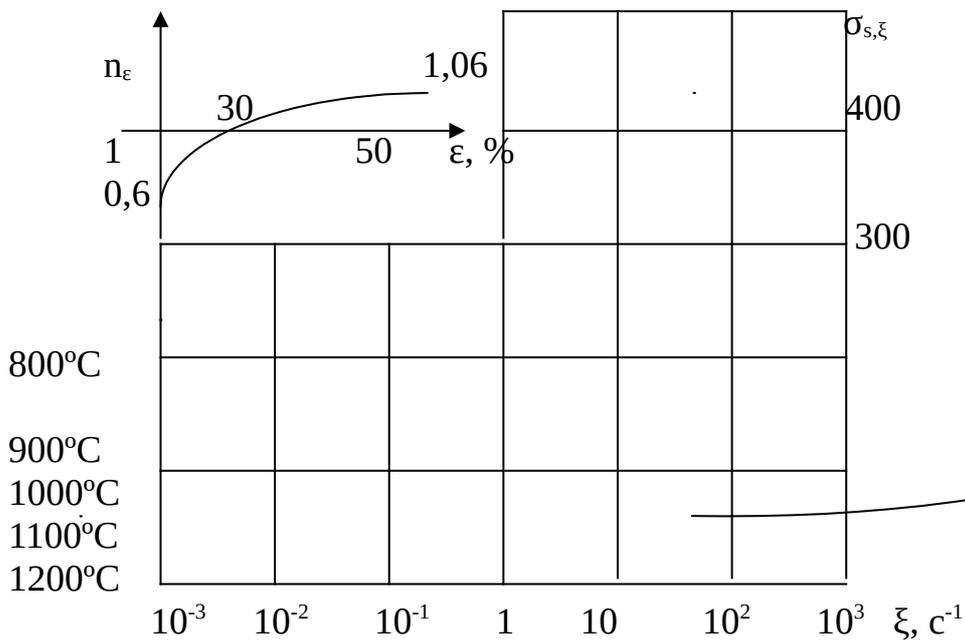


Рисунок 1.2 - Зависимость $\sigma_s - \xi$ при сжатии (сталь 1X18H9T)
 n_ϵ - деформационный коэффициент.

2) Фиксируют точку М максимального усилия деформирования, проводят прямую MW, параллельную упругому нагружению OE. Величина усилия GW фиксируется по контрольной стрелке показателя усилий и записывается в акте испытаний.

3) Область 2- область равномерной по длине образца однородной деформации (т.е. участок OW) разбивает на несколько одинаковых отрезков (на рисунке 1.3- десять отрезков, и точке W соответствует точка $J= 10$).

4) Из каждой J-той точки ($J=0, N, I, K, 2...W, R$) индикаторной диаграмме проводят параллельные OE и MW прямые до пересечения с P- Δl кривой; измеряют линейкой отрезки GJ для точек O, N, I, K, 2, 3...W, R а также для точек O, N, I, K, 2, 3...W,R по оси перемещений Δl . Составляют таблицу (таблица 1.1 акта исследования), причем упругая деформация, определяемая отрезком JJ, исключается, и все дальнейшие вычисления проводят для остаточных (пластических) деформаций.

При вычислении σ_s, ϵ по индикаторной диаграмме P- Δl необходимо учитывать явление потери устойчивости равномерного удлинения и начала докализованной деформации в шейке в точке W (рисунок 1.3). В области 3 неравномерной неоднородной деформации

(WR на рисунке 1.3) локализация деформации в шейке тем больше, чем ближе к точке разрушения R. Различие в характере распределения напряжений и деформаций в областях 2 и 3 приводит к различным способам вычисления σ_s ε .

Для области 2

$$\varepsilon_J = \ln(\ell_J / \ell_0) = \ln(1 + \Delta\ell_J / \ell_0) = \ln(1 + \varepsilon_J) \quad (1.2),$$

$$\sigma_{SJ} = P_J \cdot \ell_J / F_0 \cdot \ell_0 = \sigma_{OJ}(1 + \varepsilon_J) = \sigma_{OJ} \exp \varepsilon_J, \quad (1.3),$$

где F_J , ℓ_J , $\Delta\ell_J$ и ε_J – площадь поперечного сечения, длина образца, абсолютное и относительное удлинение на любом этапе растяжения для области 2 в точке;

F_0 и ℓ_0 – начальные (по деформации) площадь поперечного сечения и длина образца.

Усилие растяжения (рисунок 1.3)

$$P_J = \lambda_p * GJ = P_m * GJ / \sigma W \quad (1.4)$$

определяют измерениями соответствующих отрезков σJ и σW индикаторной диаграммы при известном значении P_m – максимального усилия растяжения, фиксируемого контрольной стрелкой силоизмерительного прибора испытательной машины.

В формуле (1.4) $\lambda_p = P_m / \sigma W$ – масштаб по шкале усилия растяжения.

Удлинение определяется по формуле

$$\Delta\ell_J = \lambda_\ell * OJ = (\ell_p - \ell_0) * OJ / OR \quad (1.5)$$

Для области 3.

Деформация локализована в шейке и в расчетах ε_J и σ_{SJ} по формулам (1.2) и (1.3) необходимо знать величину локальной деформации $\varepsilon_{\max J}$ (рисунок 1.4, а- г), которая в 1,5 ... 2 и более раз превосходит усредненную по длине образца деформацию при разрушении ε_{cp}

$$\bar{\varepsilon}_{cp} = 1/t \int_l \bar{\varepsilon}_J(z) dz = \ln \ell_J / \ell_0 \quad (1.6)$$

Величину ε_{cp} , для любой точки $R \geq J \geq W$ можно определить, используя формулу (1.6), однако для вычисления локальной деформации ε_{maxJ} необходимо знать функцию $\varepsilon_j(z)$, т.е. в каждый момент времени при $J > W$ необходимо знать контур образца.

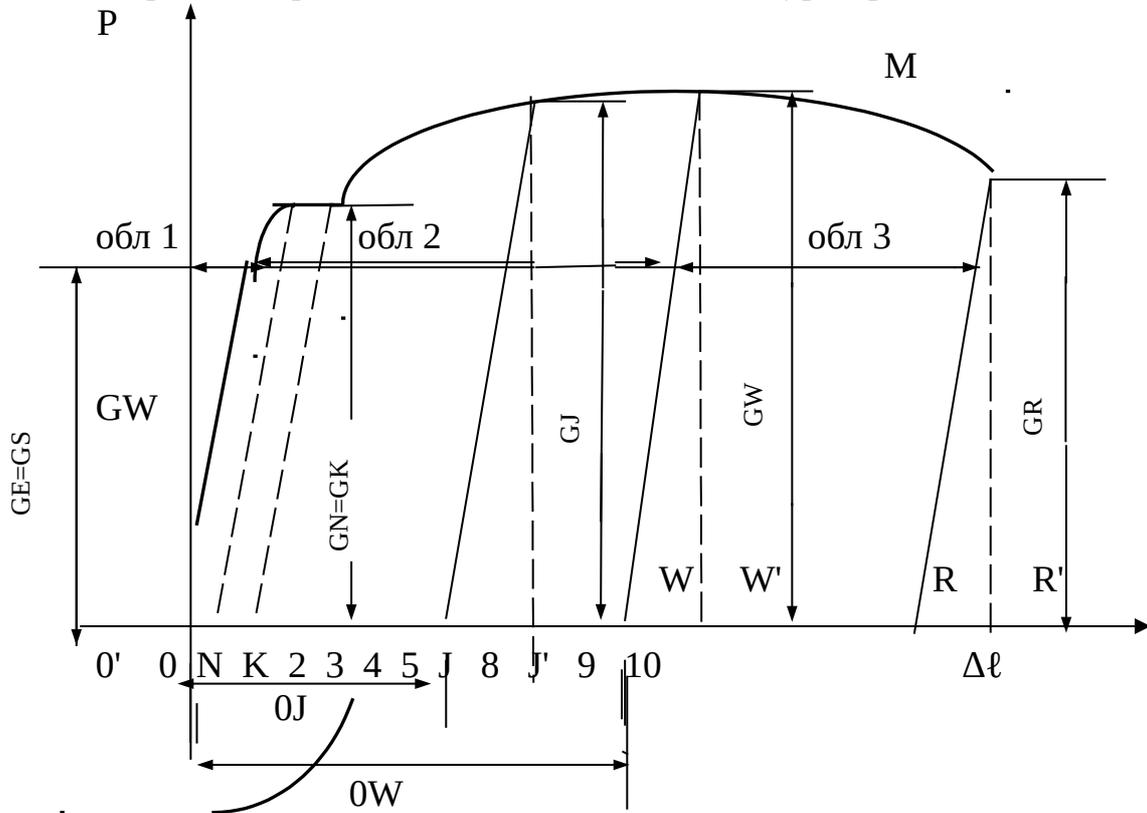


Рисунок 1.3 - Индикаторная диаграмма: N и K – точки начала и конца площадки текучести; 00' – отрезок, фиксирующий удлинение образца и деталей испытательной машины

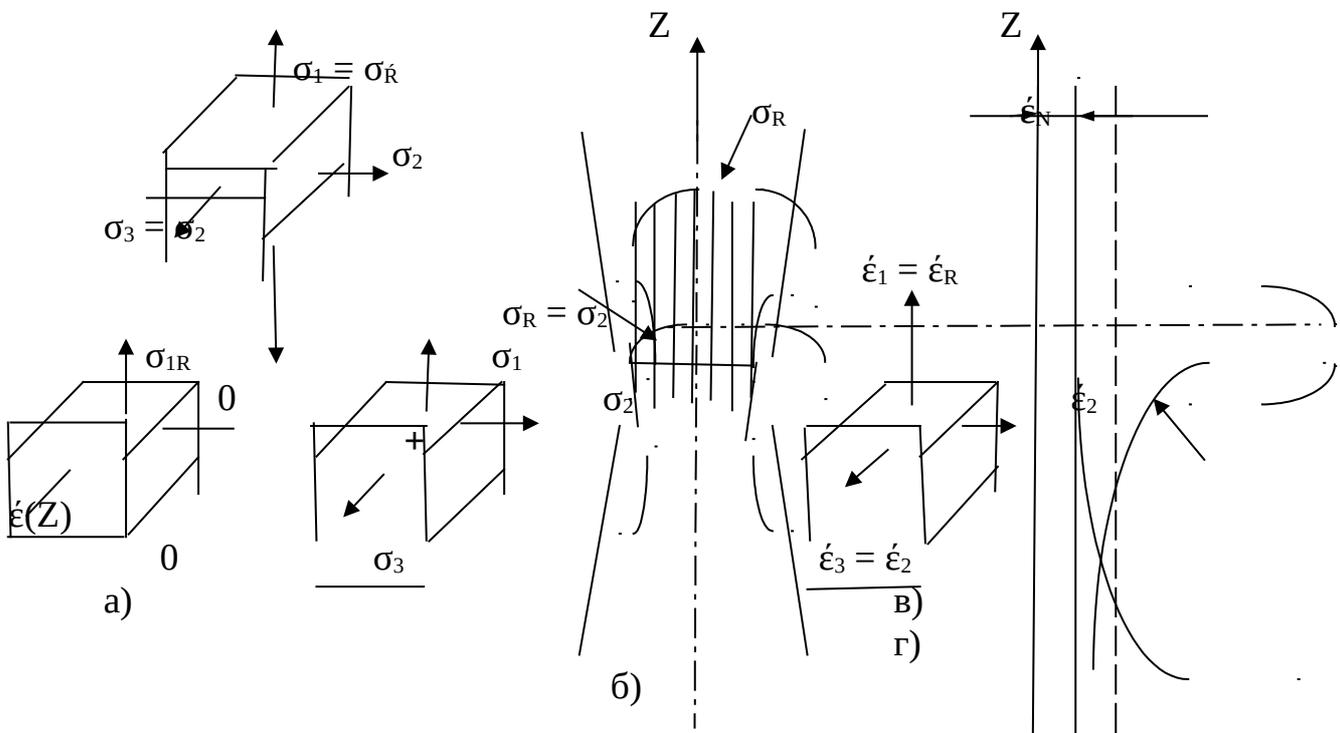


Рисунок 1.4 Схемы главных напряжений (а); эпюры напряжений (б); схема главных деформаций (в); распределение деформации по шейке (г).

Такие измерения приводят к существенному усложнению эксперимента, особенно при высокотемпературных испытаниях. Поэтому ставится задача определения $\sigma_s(\varepsilon)$ без привлечения дополнительных экспериментальных данных.

Для точки разрушения R:

$$\varepsilon_R = \ell_n d_0^2 / d_R^2; \sigma_R = P_R / F_R = \sigma_{0R} * \exp \varepsilon_A = \sigma_{0R} * d_0^2 / d_R^2, (1.7.)$$

где d_0 и d_R - начальный диаметр образца и диаметр после разрушения;

σ_R и σ_{0R} - разрушающее напряжение (Рис. 1.4. а) и условное напряжение при разрушении. Напряжение σ_{0R} используется для распространения условных диаграмм (Рис. 1.5. а, б);

P_R - разрушающее усилие, определяемое по формуле (1.4.) заменой индексов J на индекс R.

Вследствие потери устойчивости при растяжении и образовании шейки образца диаграммы $P-\Delta\ell$, $\sigma_0-\bar{\varepsilon}_{cp}$ и $\sigma_0-\bar{\varepsilon}$ (здесь ε определяется по формуле (1.2.) при $J < W$ и формуле (1.7.) для $J = R$) имеют максимум при $J = W$. Поэтому, учитывая, что формула (1.3.) в виде

$$\sigma_{SJ} = \sigma_{OJ} \times \exp \bar{\varepsilon}_J \quad (1.8)$$

справедлива при любых значениях J, включая J>W, производная

$$\sigma'_{SJ} = \frac{d\sigma_{SJ}}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma_{OJ}}{d\varepsilon} \cdot \exp \bar{\varepsilon}_J$$

$$\text{в точке } J=W \left[\frac{d\sigma_{OJ}}{d\varepsilon} \Big|_{J=W} \right] = 0$$

определяется формулой:

$$\sigma'_{sw} = \frac{d\sigma_{SJ}}{d\varepsilon} \Big|_{J=W} = \sigma_{OJ} \times \exp \bar{\varepsilon}_J \Big|_{J=W} = \sigma_{SJ} \Big|_{J=W} = \sigma_{sw} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.9.)$$

где α - угол наклона касательной YZ (рис. 1.5. в, г) к $\sigma_s - \bar{\varepsilon}$ кривой в точке M_I при J=W.

Итак, для области 3 известно, что:

при J=W и $\bar{\varepsilon}_J = \bar{\varepsilon}_w$;

$$\sigma_{zJ} = \sigma_{sw}; \quad \sigma'_{SJ} = \sigma_{sw}; \quad (1.10)$$

при J=R и $\bar{\varepsilon}_J = \bar{\varepsilon}_R$;

$$\sigma_{SR} = \sigma_R / (1 + d_R / 4R_R) \quad (1.11)$$

Формула Давиденкова- Спиридоновой (1.11) учитывает эффект «упрочнения формы», связанной с тем, что разрушающее напряжение σ_R определяемое по формуле (1.7), превышает сопротивление деформации при разрушении σ_{zR} на величину напряжений $\sigma_2 = \sigma_3$ (рис. 1.4 а), создаваемых формой шейки, как концентратором напряжений. В шейке возникают напряжения, соответствующие схеме всестороннего растяжения, поэтому сопротивление следует определять как

$$\sigma_{SR} = \sigma_R - \sigma_2,$$

что и учитывается формулой (1.11),

где R_R - радиус кривизны контура шейки при разрушении (рис. 1.4 б).

Наличие условий (1.10) и (1.11) а также плавный, параболический характер диаграммы $\sigma_s - \bar{\varepsilon}$ при J>W дает основание аппроксимировать этот участок с началом координат в точке W квадратичной параболой:

$$\sigma_{SJ} = \sigma_{sw} + \sigma_{sw} (\bar{\varepsilon}_J - \bar{\varepsilon}_w) - c (\bar{\varepsilon}_J - \bar{\varepsilon}_w)^2; \quad (\varepsilon_J > \varepsilon_w), \quad (1.12)$$

где коэффициент C определяется из условия (1.11)

$$c = [-\sigma_{SR} + \sigma_{sw} (1 + \bar{\varepsilon}_R - \bar{\varepsilon}_w)] / (\bar{\varepsilon}_R - \bar{\varepsilon}_w)^2. \quad (1.13)$$

Формулы (1.12) и (1.13) позволяют вычислить сопротивление деформации σ_{SJ} при J>W по любому заданному количеству точек.

Исследуя (1.12) на экстремум, приходим к выводу, что при

$$\bar{\epsilon}_J = \bar{\epsilon}_M = \bar{\epsilon}_W + \sigma_{sw} / 2 \times C \quad (1.14)$$

возможно появление максимума М на диаграмме $\sigma_s - \bar{\epsilon}$ (рис. 1.5. в), причем при $\bar{\epsilon}_J > \bar{\epsilon}_M$, производная $\sigma_{sJ} < 0$, что свидетельствует о накоплении достаточной энергии для начала разупрочняющих процессов. В частности, при $\sigma_{SR} = \sigma_{sw}$ максимум будет при $\bar{\epsilon}_M = \bar{\epsilon}_W + 0,5(\bar{\epsilon}_R - \bar{\epsilon}_W)$, т. е. В середине между точками R и W по шкале логарифмических деформаций.

Полученные, описанным выше способом, диаграммы $\sigma_s - \bar{\epsilon}$ применяется для решения ряда следующих практических важных задач /2.3/:

1. Степень упрочнения и назначение смягчающего отжига после холодной деформации оцениваются деформационными коэффициентами

$$K_\epsilon = \sigma_s / \sigma_T \text{ и } K_{\epsilon_{max}} = \sigma_{smax} / \sigma_T. \quad (1.15)$$

2. Интенсивность упрочнения оценивается касательными модулем пластичности или коэффициентом упрочнения

$$K_u = d\sigma_s / d\bar{\epsilon} = \sigma'_s. \quad (1.16)$$

При $\sigma_{\square s} = 0$ наблюдается равновесие между упрочняющими и разупрочняющими процессами а значение K_ϵ достигает максимальной величины.

3. Диаграммы $\sigma_s - \bar{\epsilon}$ ил табулированные данные используются для расчета энергосиловых параметров. В расчетах на ЭВМ удобно использовать реологические модели типа:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= a + v \bar{\epsilon}^c; \\ \sigma_s &= a + v e^{-\bar{\epsilon}} \\ \sigma_s &= a + v \bar{\epsilon} + c e^{-\bar{\epsilon}} \text{ и др.,} \end{aligned} \quad (1.17)$$

где реологические константы а, в, с, и т. д (ил зависимые от $\dot{\epsilon}$ реологические переменные) можно определить, например аппроксимацией диаграмм $\sigma_s - \dot{\epsilon}$ по методу наименьших квадратов или удовлетворяя естественным физическим условиям при:

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_J = 0 & \quad \sigma_s = \sigma_T \\ \bar{\epsilon}_J = \bar{\epsilon}_W & \quad \sigma_s = \sigma_{sw} \text{ и } \sigma'_s = \sigma_{\square sw} \\ \bar{\epsilon}_J = \bar{\epsilon}_R & \quad \sigma_s = \sigma_{SR} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Пересчетом диаграмм $\sigma_s - \bar{\epsilon}$ получают диаграммы $T_s - \bar{\Gamma}$ ($T_s = \sigma_s/\sqrt{3}$; $\bar{\Gamma} = \sqrt{3} \bar{\epsilon}$), используемые в физических уравнениях связи деформационной теории; $\sigma_k - \sigma = M_p \cdot \bar{\epsilon}_k$; $\sigma_k \parallel \bar{\epsilon}_k$ - главные напряжения и деформации; M_p - секущий модуль пластичности, где скалярная характеристика:

$$M_p = 2T_s / \bar{\Gamma} = 2\sigma_s / 3 \bar{\epsilon} \quad (1.19)$$

Определяется непосредственно из эксперимента ил по формулам (1.17).

В данной лабораторной работе анализируется возможность использования реологических математических моделей (1.17) для различных целей:

1. Для расчетов сопротивления деформации σ_s вопрос о возможности использования (1.17) решается сравнением экспериментально полученных значений с рассчитанными по реологической модели (1.17).

2. Для расчетов K_ϵ , K_y и M_p - сравнением экспериментальных значений с полученными из формулы (1.17) расчетными значениями. Для каждой из перечисленных величин определяются доверительный интервал, относительная погрешность и доверительная вероятность, оценивающие степень надежности использования реологических моделей (1.17).

III. Исходные данные, оборудование, инструмент, образцы.

При проведении лабораторной работы используется испытательная машина для растяжения – сжатия с электрическим приводом, снабженная устройством записи индикаторной диаграммы с произвольно заданными масштабами по удлинению и усилию.

В работе используются цилиндрические образцы по ГОСТу 1497- 84. По всей рабочей части образца через каждые 10 мм нанесены неглубокие риски, позволяющие построить эпюру распределения остаточной удлинения

$\Delta l(z)$ и деформацией $\bar{\epsilon}(z)$ по длине образца (см. рис. 1.5. г).

Измерения диаметра образцов до испытания проводятся микрометром, измерения разрушенного образца – микроиндикатором и штангенциркулем после совмещения частей образца в специальном зажимецентрираторе.

IV 4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

V 1. Измерить микрометром диаметр образца в трех-четырёх точках по его длине с точностью 0,01 мм, провести столько

же измерений длины образца между крайними рисками штангенциркулем, зафиксировать размеры $D\emptyset$ и $L\emptyset$ в акте испытаний (табл. 1.1).

2. Установить образец в захватах испытательной машины и пишущий узел приспособления для записи индикаторной диаграммы. Включить электропривод машины. Растянуть образец до разрушения.

3. Разрушенный образец извлечь из захватов испытательной машины, снять с барабана записывающего устройства индикаторную диаграмму. Закрепить разорванный образец в зажиме-центраторе. Измерить три-четыре раза микроиндикатором или микрометром диаметр D_R (d_R – диаметр шейки при разрушении) и радиусометром-радиус R_A кривизны контура шейки образца, результаты занести в акт испытаний (Табл. 1.1), зафиксировав эскиз образца после испытания и отметив характер разрушения.

4. По контрольной стрелке силоизмерителя определить максимальное усилие P_{max} в ньютонах, результат занести в п.3 акта испытаний.

5. По индикаторной диаграмме определить данные для построения кривых истинных напряжений.

Результаты измерений заносятся в табл. 1.2.

6. Измерением диаметра образца в разных точках по его длине (или измерением расстояний между нанесенными на образец рисками) построить зависимость $\Delta l(z)$; $\epsilon(z)$, составив акт исследования (табл. 1.3).

7. Обработка экспериментальных данных, зафиксированных в акте испытаний, проводится на ЭВМ СМ-4 в часы, предусмотренные учебным планом курса ТОМД на самостоятельную работу студента.

8. Студент вызывает программу $\square R1$, вносит исходные данные из акта испытаний, получает распечатку, содержащую паспорт механических испытаний, расчеты сопротивления деформации и результаты расчетов реологической модели (1.17). В соответствии с заданием преподавателя, используя физические условия (1.18) или метод наименьших квадратов, студент по рассчитанным значениям σ_T , σ_{sw} , σ_{SR} , $\bar{\epsilon}_w$, $\bar{\epsilon}_R$ определяет реологические константы одного из заданных уравнений (1.17), составляет программу и в точках D, N, I, K, 2, 3, ..., W, II, 12, ..., R рассчитывает значение σ_s , K_y , M_p , K_ϵ и заполняет табл. 1.4 акта исследования.

Студент отвечает на вопросы, относящиеся к анализу полученных результатов, и при удовлетворенных знаниях получает зачет, работе с указанием перечня допущенных в тетради для лабораторного практикума.

5 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ.

По результатам испытаний образца составляется акт по нижеприведенной форме.

АКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Общие сведения о приведенных испытаниях:

- тип испытательной машины;
- марка стали и сплава по ГОСТу;
- скорость активного захвата;
- температура испытания в град. °С.

2. размеры образца до и после деформации.

Таблица 1.1

Экспериментальные данные

Измеренная величина	DØ	Ø	DR	R	RR
1-е измерение					
2-е измерение					
3-е измерение					
Среднее значение					

3. Максимальное усилие по индикаторной стрелке измерительного прибора испытательной машины.

$$P_{\max} (H) = PM = \text{_____} H.$$

Таблица 1.2

Обработка индикаторной диаграммы

№ пп	Ø	N	1*	K*	2*	3	...	J	...	W	R
мм	GE	GN	G1	GK	G2	G3	...	GJ	...	GW	GR
мм	-	ØN	-	ØK	-	-	-	-	-	ØW	ØR

В таблице 1.2 вместо обозначений GE, GN, G1, GK..., GR ставятся их значения в мм; значение ØJ фиксируется в точках N, K, W и R измерением отрезков ØN, ØK, ØW, ØR в мм.

5. Результаты измерений для вычисления деформаций $\bar{\varepsilon}(z)$

Таблица 1.3

Данные для вычисления $\bar{\varepsilon}(z)$

координата z, мм
Диаметр образца при заданном z
$\bar{\varepsilon} = \ln(d_0/dz)^2$

Порядок следования $\emptyset, N, K, I, 2, \dots; \emptyset, N, I, K, 2, \dots; \emptyset, N, I, 2, K, 3, \dots$ может быть любым в зависимости от протяженности площадки текучести и выбранного количества точек на участке $\emptyset W$.

6. Реологические константы по физическим условиям (1.18).

7. Результаты расчетов на ЭВМ для заданной в п.6 реологической модели.

Таблица 1.4

Результаты расчетов реологической модели

№ пп	\emptyset	N	1	K	2	...	9	W*	11	...	R
EJ											
SS											
DK											
KU											
MP											

*Количество точек в области 2 выбирается обычно 10, в области 3- 5...6.

6 ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

VI 1. Конспект теоретического введения, эскиз образца после испытаний, результаты вычислений (распечатка с ЭВМ).

2. Графический материал, выполненный на миллиметровой бумаге: индикаторная диаграмма $P - \Delta l$; диаграммы $\sigma_0 - \bar{\varepsilon}_{гр}$; $\sigma_0 - \bar{\varepsilon}$ и $\sigma_s - \bar{\varepsilon}$ с касательной YZ.

3. Констатирующие выводы о проведенных испытаниях, точности определения величин σ_s и $\bar{\varepsilon}$, анализ изменения K_ε, K_y, M_p от $\bar{\varepsilon}$ причин повышения сопротивления деформации и снижения величины K_y с увеличением степени деформации.

4. выводы о возможности использования математических реологических моделей, полученных по методу наименьших квадратов.

7 ЛИТЕРАТУРА

(Основная)

1. Полухин П. И., Гун Д. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. – М.: металлургия, 1983.- 351 с.

2. Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением М.: Металлургия, 1967.- 261 с., С. 112...120.

(дополнительная)

3.Смирнов- Аляев г. А. Сопротивление металлов пластическому деформированию Л.,: Машиностроение, 1978.- 366 с., С. 146...158.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1.Дать определение сопротивлению деформации. Перечислить факторы, влияющие на сопротивление деформации.

2. Что такое наклеп (упрочнение)?

Каковы причины увеличения σ_s с ростом степени остаточной деформации?

3. Дать определение пределов упругости, пропорциональности, текучести, прочности (σ_B).

4. При каких условиях $\sigma_s = \sigma_{O,R}$ или $\sigma_s = \sigma_T$?

5. На какую величину σ_B отличается от σ_s при $\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}^w$.

6. Какие характеристики прочности могут быть равны σ_s и при каких условиях?

7. По какой формуле определяется истинное напряжение?

8. Какова схема напряженно- деформированного состояния в шейке растягиваемого образца?

9. Охарактеризовать процесс деформации при растяжении образца до и после образования шейки.

10. Охарактеризовать каждую область на условной диаграмме растяжения.

11. какова физическая сущность явления наклепа?

12. Какие характеристики пластичности определяются при растяжении?

13. Почему уменьшается величина σ_{SJ} с ростом степени деформации?

14. Как определить сопротивление деформации с помощью термомеханических коэффициентов?

15. Чем объясняется наличие в начале индикаторной диаграммы нелинейного участка?

16. Как производится пересчет индикаторной диаграммы в условную?

17. При каких скоростях деформации можно принять $n_z=1$?

18. По рис. 1.1 и 1.2 определить сопротивление деформации при $t=900^\circ\text{C}$, $\xi = 10\text{с}^{-1}$, $\dot{\epsilon}=0,3$?

19. с какой целью на образце нанесены риски через 10мм?

ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

20. Как определить радиус шейки R_R , используя эпюру остаточных удлинений (или деформации) по длине образца?

21. Во сколько раз локальная деформация при разрушении $\bar{\epsilon}_R$ больше усредненной $\bar{\epsilon}_{гр,R}$ по длине образца (рис. 1.5 г)?

22. Чему равны относительные сужение и удлинение в данном опыте?

23. Во сколько раз σ_R больше σ_{SR} ?

24. Во сколько раз предельная величина сопротивления деформации отличается от предела прочности?

25. во сколько раз модуль упругости E больше максимального (минимального) значения M_p ?

26. Чему равны максимальный и минимальный модуль пластичности?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИЗУЧЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ В СТАЦИОНАРНОМ ПРОЦЕССЕ ПЛОСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1 Освоить графический метод обработки координатной сетки и оценить точности эксперимента.

2.Изучить неравномерность деформации и скоростей течения в стационарном процессе плоского прямого прессования, получить навыки анализа неравномерности деформации.

3.Убедиться в достоверности закона постоянства секундных объемов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Если каждая компонента тензора ϵ_{ij} постоянна в деформируемом объеме, т.е. $\text{grad } \epsilon_{ij}=0$, то деформация считается равномерной. Аналогичные рассуждения справедливы в случае равномерного

распределения напряжений σ_{ij} скоростей деформации ξ_{ij} и скоростей течения металла V_i в деформируемом объеме.

Процессы обработки давлением, как правило, характеризуются существенной неравномерностью распределения деформаций и скоростей течения металла.

Метод координатным позволяет экспериментально исследовать неравномерные поля скоростей и деформаций в процессах обработки давлением. Нанесенная на образец прямоугольная координатная сетка с координатами материальной точки M до деформации a_i (a_1, a_2) (рис. 2.1) искажается и в процессе плоской деформации, эта же материальная точка в деформированном состоянии имеет координаты x_i (x_1, x_2).

Как мы видим, движение материальной точки определяется по отношению к некоторой системе отсчета- система координат, с помощью которой устанавливается соответствие между числами и точками пространства можно провести три координатные линии. Если координатные линии прямые, то это прямолинейная система координат, если нет- то криволинейная.

Материальная точка (частица движется относительно системы координат x_1, x_2, x_3 и последовательно занимает точки пространства, если ее координаты меняются в зависимости от времени

$$x_i = \varphi_i(t) \quad (2.1)$$

Движения частицы известны, если известны функции (2.1), называемые законом движения частицы.

Сплошная среда представляет собой непрерывную совокупность частиц. Знать движение сплошной среды- это значит знать движение всех ее частиц. Для этого необходимы правила индивидуализации отдельных частиц континуума. Индивидуальные частицы сплошной среды можно, например, задавать значениями их начальных координат a_1, a_2, a_3 и координат частиц в любой момент времени x_1, x_2, x_3 . Для любой частицы континуума, выделенной координатами a_1, a_2, a_3 можно записать закон движения, в который входят функции уже не одной, как в случае движения одной материальной точки, а четырех переменных – начальных координат a_1, a_2, a_3 и времени t .

$$x_i = \varphi_i(a_1, a_2, a_3, t). \quad (2.2)$$

Если уравнение (2.2) a_i будет фиксированным, t - переменным, то уравнение (2.2) даст закон движения одной фиксированной частицы континуума. Если a_i будут переменными, а t - фиксированными, то уравнение(2.2) даст распределение частиц континуума в пространстве в данный момент времени. Если переменными будут a и t , то на (2.2)

можно смотреть как на формулу, определяющую движение сплошной среды.

Координаты a_i , индивидуализирующие частицы континуума, и время t называются переменными Лагранжа.

Как всякое движение, движение континуума всегда определяется по отношению к некоторой системе координат x_1, x_2, x_3 - системе отсчета наблюдателя. Эта система координат может быть выбрана произвольно. Она вводится условно и выбор ее зависит от исследователя. Вместе с тем, в случае движения сплошной среды нужно ввести еще сопутствующую систему координат. Наряду с координатами x_i , лагранжевы координаты индивидуальных частиц a_i можно рассматривать как другие координаты тех же точек пространства в некоторой области. Соответствующая система координат a_i в том же пространстве образует подвижную деформируемую криволинейную систему координат γ_i , которая называется сопутствующей системой координат. Так, если в начальный момент выбрать в сплошной среде некоторые координатные линии a_i (рис. 2.2), состоящие из частиц сплошной среды, то в следующий момент времени они вместе с частицами континуума вновь перейдут в координатные линии сопутствующей системы. Однако, если в начальный момент они и были выбраны прямыми, то в следующий момент они вообще говоря, будут искривленными.

Таким образом, если рассматривать систему координат, связанную с частицами сплошной среды, то она с течением времени будет изменяться, т.к. она «вморожена» в среду и деформируется вместе с ней. Такая «вмороженная» система координат и определена выше как сопутствующая система. Все частицы сплошной среды всегда покоятся относительно подвижной системы координат, т.к. их координаты a_i в сопутствующей системе координат γ_i не меняются.

Использование в качестве независимых переменных a_i и t составляют точку зрения Лагранжа на изучение движения сплошной среды, которая, таким образом, существенно опирается на описание истории движения каждой точки сплошной среды в отдельности. При этом, все координатные линии в любой момент времени движения проходят через одни и те же частицы сплошной среды, а следовательно, начальные координаты, которым можно поставить в однозначное соответствие обозначение или номер материальной точки, неизменны во времени, т.е. материальная (полная, субстанциональная) производная изменения a_i равна нулю:

$$\frac{da_i}{dt} = \frac{da_i}{dt} + \frac{da_i}{dx_j} \times \frac{dx_j}{dt} = 0 \quad (2.3)$$

где производные $\partial x_i / \partial t$ берутся при постоянных a_i и, следовательно, являются компонентами скорости u соответственно.

Поэтому

$$\frac{da_i}{dt} = \frac{da_i}{dt} + \frac{da_i}{dx_j} v_j = 0 \quad (2.4)$$

Предположим теперь, что нас интересует не история движения индивидуальных частиц сплошной среды, а то, что происходит в разные моменты времени в данной геометрической точке пространства, связанной с системой отсчета наблюдателя. Пусть наше внимание концентрируется на данной точке пространства, в которую приходят разные частицы сплошной среды. Это и составляет сущность точки зрения Эйлера на изучение движения сплошной среды.

Точка зрения Эйлера весьма часто употребляется в приложениях. Геометрические координаты пространства x_i и время t носят название переменных Эйлера. Движение, с точки зрения Эйлера, считается известным, если скорость v , ускорение ω и другие интересующие величины заданы как функции x_i и t . Функции $v = v_i(x_i, t)$, $\omega = \omega_i(x_i, t)$, при фиксированных x_i и переменном t , определяют изменения со временем скорости, ускорение и т.д. в данной точке пространства для разных, приходящих в эту точку частиц. При фиксированных t , переменных x_i эти функции дают распределение характеристик движения в пространстве в данный момент времени t при переменных x_i и t - распределение характеристик движения в пространстве в разные моменты времени.

Как было сказано выше, метод координатных сеток позволяет экспериментально исследовать неравномерные поля скоростей и деформации в процессах обработки давлением. Нанесенная на образец, прямоугольная координатная сетка с координатами материальной точки до деформации a_i (a_1, a_2) (рис. 2.1) искажается и в процессе плоской деформации эта же материальная точка в деформированном состоянии имеет координаты x_i (x_1, x_2).

Перемещения материальной точки

$$U_i = x_i - a_i = x_i(a_1, a_2) - a_i = x_i - a_i(x_1, x_2) \quad (2.5)$$

могут быть определены согласно (2.5) в форме Лагранжа, если

$$U_i = U_i(a_1, a_2), \text{ и в форме Эйлера, если } U_i = U_i(x_1, x_2).$$

В процессе деформации номер узла координатной сетки (или начальная координата) остается неизменным, а поэтому полная

(субстанциональная) производная начальной координаты по времени равна нулю:

$$\frac{da_i}{dt} = \frac{da_i}{dt} + \frac{da_i}{dx_j} v_j = 0 \quad (2.4)$$

Для стационарного процесса (прокатка, волочение, прессование), проходящего вдоль направления оси x_1 (рис. 2.1), при заданных частных производных начальных координат по текущим $\partial a_i / \partial x_j$, систему (2.4) можно рассматривать, как схему линейных уравнений относительно неизвестных v_j , для которой:

$$\frac{da_2}{dt} = \frac{da_3}{dt} = 0, \quad (2.6)$$

т.к. при течении металла вдоль оси x_1 начальные координаты остаются неизменными. Для недеформированной части образца точке N_1 , а также любой точке N_1' в зоне деформации с пространственной координатой x_1 моменту времени t_1 соответствует материальная координата a_1 . К моменту времени $t_1 + \Delta t$ в этой же точке пространства с координатой x_1 оказывается новая (предыдущая) материальная точка N_2 (или N_2') с координатой $a_1 - \Delta a_1$ (рис. 2.1). Поэтому

$$\frac{da_1}{dt} = \frac{(a_1 - \delta a_1) - a_1}{(t_1 + \delta t_1) - t_1} = -v_0, \quad (2.7)$$

где v_0 - скорость недеформированного конца.

Для двухмерного течения металла, изучаемого в настоящей лабораторной работе на частном примере плоского прессования, перемещения $U_3(x_1, x_2)$ в направлении x_3 запрещены, т.е. $U_3 = 0$ ($x_3 = a_3$) и как следует из (2.5)

$$\frac{\partial U_3}{\partial a} = \frac{\partial U_3}{\partial x_2} = \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0, \text{ т.е. } \frac{\partial a_3}{\partial x_1} = \frac{\partial a_3}{\partial x_2} = 0, \text{ а } \frac{\partial a_3}{\partial x_3} = 1 \quad (2.8)$$

Перемещения U_1 и U_2 остаются неизменными по всей ширине образца, являются функциями x_1 и x_2 и не зависят от x_3 , т.е. $\partial U_1 / \partial x_3 = \partial U_2 / \partial x_3 = 0$ и, как следует из (2.5)

$$\partial a_1 / \partial x_3 = a_{1,3} = 0; \partial a_2 / \partial x_3 = a_{2,3} = 0 \quad (2.9)$$

Условия (2.6...2.9) для плоского деформированного состояния существенно упрощают систему уравнений (2.4):

$$\begin{aligned} v_1 \cdot a_{1,1} + v_2 \cdot a_{1,2} &= v_0, \\ v_1 \cdot a_{2,1} + v_2 \cdot a_{2,2} &= 0, \end{aligned} \quad (2.10)$$

определитель которой при измененном объеме равен единице

$$a_{1,1} \cdot a_{2,2} - a_{2,1} \cdot a_{1,2} = 1$$

Решение системы (2.10) с учетом (2.11):

$$v_1 = v_0 \cdot a_{2,2}; v_2 = -v_0 \cdot a_{2,1}; v_3 = 0, \quad (2.12)$$

где частные производные начальных координат по конечным :

$$a_{2,2} = \frac{\partial a_2}{\partial x_2} = 1 - \frac{\partial U_2}{\partial x_2}; \quad a_{2,1} = \frac{\partial a_2}{\partial x_1} = \frac{\partial x_2}{\partial x_1} - \frac{\partial U_2}{\partial x_1} = - \frac{\partial U_2^*}{\partial x_1} \quad (2.13)$$

получаются дифференцированием $U_2(x_1, x_2)$ по x_1 и x_2 .

В данной работе для получения поля перемещений $U_2(x_1, x_2)$ в эйлеровом представлении использована обработка данных метода координатной сетки.

Перемещаясь слева направо от недеформированной зоны вдоль линии тока (сплошные линии на рис. 2.3), отмечают пересечения деформированной и недеформированной сеток. Например, перемещаясь вдоль линии тока с порядковым номером $k=8$, получаем при пересечении с линиями начальной сетки с номером r точки следующего порядка $n=k-r$: $n=0$ для $r=8$ (точка α); $n=1$ для $r=7$ (точка β); $n=2$ для $r=6$ (точка γ); $n=3$

* x_1 и x_2 - независимые координаты, поэтому

$$\partial x_2 / \partial x_1 \partial a_1 / \partial x_3 = 0.$$

для $r=5$ (точка δ) и т.д.

Проводя аналогичные построения для остальных линий тока, и соединяя точки с одним уровнем n или $U_2 = \eta r$ (r - шаг недеформированной сетки), получаем линии одинакового уровня $U_2 = \text{const}$ (обозначено точками на рис. 2.3). Совокупность линий $U_2 = \text{const}$ и есть поле U_2 .

Поле перемещения обладает следующими свойствами:

1 Линии равных перемещений не пересекаются, ибо в противном случае в одной точке $M(x_1, x_2)$ было бы два или больше значений перемещений $U_i(x_1, x_2)$.

2 Если направление составляющей вектора перемещения совпадает с направлением координатной оси, то перемещение в этом направлении считается положительным, иначе оно отрицательно.

3 Для симметричного, относительно x_1 , процесса прессования поле равных горизонтальных перемещений U_1 симметрично относительно оси x_1 , а для поля равных вертикальных перемещений перемещение U_2 антисимметрично.

4 Значение перемещения на границе образца $U_{2(\text{гр})}$ в некоторой точке δ (см. рис. 2.3) равно разности координат точек a и δ_1 определяемых конфигурацией инструмента и деформируемо полосы.

Для определения частных производных перемещений по текущим координатам можно использовать метод численного дифференцирования (см. рис. 2.4, а):

$$U_{2,2} = \frac{\partial U_2}{\partial x_2} \approx \frac{\delta U_2}{\delta x_2} = \frac{U_{2,(i+1)} - U_{2,(i-1)}}{x_{2,(i+1)} - x_{2,(i-1)}} \quad (2.14)$$

Шаг дифференцирования должен быть настолько мал, чтобы на участке $\Delta x_{2(i)}=2q$ кривую $U_2(x_2)$ можно было бы заменить участком прямой. В этом случае считают, что на длине двойного шага $2 \cdot q$ деформация- равномерная, т.е. перемещение $2 \cdot q$ на длине $2 \cdot q$ линейно зависит от x_2 , $\Delta U_{2,2}=\text{const}$. Обычно выбирают значение $q \approx (0,1 \dots 0,05)h_1$ (рис. 2.3).

Для количественной оценки неравномерности скорости течения металла могут быть использованы следующие показатели:

$$K_{v,\max} = \frac{v_{1,\max}}{v_{1,\min}}; \quad K_i = \frac{v_{1,i} - v_{1(\text{cp})}}{v_{1(\text{cp})}} = \frac{a_{2,2(i)} - a_{22(\text{cp})}}{a_{2,2(\text{cp})}}, \quad (2.15)$$

Которые дают представление о различии (размахе) максимальных и минимальных горизонтальных скоростей течения (коэффициент $K_{v1\max}$) или об относительном изменении локальной горизонтальной скорости $v_{1(\text{cp})}$ по отношению к средней (коэффициент K_i).

Для двухмерного течения металла ($b_0=\text{const}$) из уравнения постоянства секундных объемов $b_0 \cdot h_1^* \cdot v_{1(\text{cp})} = b_0 h_0 v_0$

Следует, что

$$v_{1(\text{cp})} = v_0 \frac{h_0}{h_1^*} = v_0 \times a_{2,2(\text{cp})}, \quad (2.16)$$

где h_1^* - высота полосы в исследуемом сечении (см. рис. 2.3);

$v_{1(\text{cp})}$ - средняя скорость в этом же сечении.

3 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, ОБРАЗЦЫ

Свинцовый образец с размерами поперечного сечения $b_0 h_0 = 30 \times 130$ мм, состоящий из двух частей толщиной по 15мм, подвергнут прямому плоскому прессованию с обжатием $\Delta h = 65 \dots 90$ мм. Координатная сетка в виде горизонтальных продольных рисок с шагом r (см. рис. 2.3) нанесена в плоскости разъема образца на одной из его половин.

Каждый студент получает копию деформированной сетки (линии тока). Все измерения производятся линейкой.

4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1 В заданном сечении построить график изменения перемещений $U_2(x_2)$ по высоте образца (рис. 2.4,а). Для этого на

миллиметровой бумаге отметить точки пересечения этого сечения с линиями тока. Координата линии тока в этих точках- x_2 . Начальная координата для каждой линии тока- a_2 , величина перемещения в обозначенных точках- $U_2(x_2) = x_2 - a_2$. Записью $U_2(x_2)$ подчеркивается, что U_2 является функцией координат x_2 после деформации (рис.2.4).

2 Плавная проведенная «гладкая» кривая, отклоняется от зафиксированных экспериментальных значений на величину δU_2 (рис.2.4,а). Определить максимальное отклонения δU_2 , максимальное значение $U_{2,max}$, относительное отклонение $\Delta = \delta U_2 / U_{2,max}$

3 На половине высоты образца с шагом $q \approx 0,1 \cdot h_1^* / 2$, начиная с оси симметрии $x_2 = 0$, с шагом q , зафиксировать значения x_2 , мм и по кривой $U_2(x_2)$ определить соответствующие значения U_2 , мм с учетом знака. Результаты записать в столбцы 2 и 3 табл. 2.1.

Шаг q для всех сечений должен быть одинаковым.

4 Используя формулу (2.14) численного дифференцирования, определи, ΔU_2 (столбец 4) для фиксированного Δx_2 , вычислить $U_{22} \approx \Delta U_2 / \Delta x_2$ (столбец 5) с учетом правила знаков:

$\Delta x_2 = x_{2(i+1)} - x_{2(i-1)} > 0$, если $x_{2(i+1)} > x_{2(i-1)}$

и $\Delta U_2 = U_{2(i+1)} - U_{2(i-1)} > 0$, если $U_{2(i+1)} > U_{2(i-1)}$

В акте исследования (п.3) отметить, при каких значениях $U_{22} > 0$ и $U_{22} < 0$.

5 По формулам (2.13) и (2.15) провести вычисления, зафиксировать их результаты в табл. 2.1, на миллиметровой бумаге построить, как показано на рис.2.4 б, в эпюры $U_{22}(x_2)$ и $a_{22}(x_2)$ по высоте образца.

6 При определении значения v_{1cp} / v_0 (п.4 акта исследования) необходимо вычислить площадь эпюры по кривой $a_{22}(x_2)$ и полученное значение разделить на высоту h_1^* .

Масштаб по x_2 1:1, масштаб по a_{22} может быть произвольной, допустим M . Поэтому для получения численного значения a_{22cp} необходимо площадь эпюры разделить на масштаб, т.е.:

$$a_{22(cp)} = \frac{v_{1(cp)}}{v_0} = \frac{F_{эн}}{h_1^* \cdot M}$$

где $F_{эн}$ - площадь под эпюрой $a_{22}(x_2)$, подсчитываемая с помощью планиметра или миллиметровой бумаги.

7 по результатам вычислений из (2.16) по эпюру скоростей находится приближенное значение $a_{22} = v_{1cp} / v_0$ и по результатам измерения линейных величин h_0 и h_1^* (п.4 акта исследования) более точное значение $a_{22(cp)}^* = h_0 / h_1^*$.

Относительное отклонение $\Delta = (a_{22}^* - a_{22(cp)}) \cdot 100\% / a_{22}^*$

Характеризует точность эксперимента, ибо согласно условию постоянства секундных объемов $a_{22(ср)} = a_{22} \cdot \Delta$.

Значение Δ фиксируется в акте исследования (п.4).

8 В акте исследования (п.5) фиксируется максимальное различие $K_{v,max}$ (см. формулы 2.15), максимальное и минимальное значение K_i .

9 Значение $a_{22(ср)}$ определить для каждого сечения, проверить условие (2.16).

АКТ ИССЛЕДОВАНИЯ (для одного сечения)

1 Максимальное по высоте отклонение экспериментальных значений от сглаженных (см. рис. 2.4,а)

$\delta U_2 =$ _____ мм.

Максимальное по высоте значение

$U_{2,max} =$ _____ мм.

Относительное отклонение $\Delta = \delta U_2 / U_{2,max} \cdot 100\% =$
 $=$ _____ %.

2 Шаг по x_2 : $\Delta x_2 = 2q =$ _____ мм

$q =$ _____ мм.

Значение $U_{22} > 0$ при _____ мм

$U_{22} < 0$ при _____ мм

(При x_2 поставить знак неравенства).

3 значение перемещения $U_{2(гр)}^*$ на границе (точка δ см. на рис.2.3)

$U_{2(гр)}^* =$ _____ мм; высота $h_0 =$ _____ мм;

высота $h_{1}^* =$ _____ мм; $h_{1}^*/2 =$ _____ мм.

Погрешность в определении перемещения на границе

$\Delta = \frac{U_2^* - 0.5\delta h^*}{0.5\delta h^*} \cdot 100\% =$ _____ %

4 Площадь эпюры под кривой a_{22} :

$F_{эп} =$ _____ мм²; значение $a_{22(ср)}$, полученного по эпюре:

$a_{22(ср)} = v_{1(ср)} / v_0 =$ _____.

$a_{22(ср)}^* = h_0 / h_{1}^*$ _____. Точность эксперимента по условию

выполнения закона постоянства секундных объемов:

$\Delta \cdot 100\% =$ _____ %.

5 коэффициенты неравномерности скоростей течения металла:

$K_{v,max} =$ _____; $K_{i(min)} =$ _____ %;

$K_{i(min)} =$ _____ %;

6 $v_1 > v_{ср}$ при $x_2 >$ _____ мм;

$v_1 < v_{ср}$ при $x_2 >$ _____ мм;

(при x_2 поставить знак неравенства).

Таблица 2.1

Вычисление частных производных и коэффициентов неравномерности скоростей течения

№ п	Координаты x_2 , мм	Переменная U_2 , мм	U U_2 , мм	ΔU ₂ / Δx ₂	a ₂₂	K _i , %
1	2	3	4	5	6	7
...	$U_2 > 0$					
...	и т.д.					
2	+2q	$U_{2(2q)}$				
1	+1q	$U_{2(1q)}$				
0	0	$U_{2(0)}$	U $U_{2(0)}$			
1	-1q	$U_{2(-q)}$				
2	-2q					
...	и т.д.					
...	$x_{2(i+1)}$	$U_{2(i+1)}$				
...	$x_{2(i)}$	$U_{2(i)}$	Δ $U_{2(i)}$			
...	$x_{2(i-1)}$	$U_{2(i-1)}$				

6 ТРЕБОВАНИЕ К ОТЧЕТУ

1 конспект теоретической части, эпюры U_2 , U_{22} и a_{22} вдоль сечений, выполненные на миллиметровой бумаге, акт исследования, результаты вычислений (таблица).

2 Выводы, констатирующие: а) об освоении методики, полученных результатах, возможностях метода и пр.; б) о точности определения изучаемых величин; в) о неравномерности поля скоростей течения в процессе прямого прессования и возникновении дополнительных растягивающих и сжимающих напряжений в зонах, где $u_1 > u_{1(ср)}$ и $u_1 < u_{1(ср)}$ (п.6 акта исследования); г) о точности выполнения условия постоянства секундных объемов. (В выводах отметить, базируясь на курсе МСС, какие величины необходимо экспериментально получить для исследования поля u_2 и каким способом изучить неравномерность распределения компонентов ξ_{ij}).

2 Алгоритм вычисления ξ_{11} , ξ_{12} , u_2 .

7 ЛИТЕРАТУРА

1 Полухин П.И., Воронцов В. К., Кудрин А. В., Чиченев Н. А. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1974.- 336 с., ил., с. 65...70.

8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Как можно геометрически представить скалярное поле, векторное поле и поле тензора второго ранга?

2 Какая деформация называется равномерной (неравномерной)?

3 Как определяется перемещение материальной точки в представлении Лагранжа (Эйлера)?

4 Почему полная (субстанциональная) производная начальной координаты по времени равна нулю?

5 как выводится формула для определения компонентов скоростей течения металла?

6 Какой вид формул для определения скоростей течения металла в случае двухмерной деформации?

7 Как определить частные производные начальных координат по конечным?

8 Как построить график U_2 (O_2) (т.е. U_2 , зависимое от лагранжевой координаты?).

9 Как определить порядок линий равных перемещений?

10 Как можно охарактеризовать неравномерность скоростей течения металла?

11 Как определить среднюю скорость течения металла в поперечном сечении образца при двухмерной деформации?

ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ ПО РАБОТЕ

12 Какова точность эксперимента, исходя из условия постоянства секундных объемов?

13 Во сколько раз максимальная скорость $v_{i, \max}$ выше минимальной $v_{i, \min}$ в исследуемом случае?

14 Вы построили эпюру v_1/v_0 в сечении с координатами x_1 и $x_1 + \Delta x_1$. Как по этим данным определить $\xi_{11} = \frac{\partial v_1}{\partial x_1}$? Чему равна ξ_{22} ?