

## **Кинетика накопления рассеянных повреждений в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях**

**А. А. Лебедев, В. П. Ламашевский, Н. Р. Музыка, В. П. Швец, Е. В. Ефименко**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Исследованы процессы накопления повреждений при статическом деформировании сталей 45, 09Г2С и латуни Л63 в исходном состоянии и после отжига на "зерно". Обсуждаются новые экспериментальные результаты исследования кинетики накопления повреждений при деформировании поликристаллических материалов, имеющих различную природу и размеры зерен, в том числе в разгруженном состоянии и под напряжением при малых и очень малых (0,05...0,15%) деформациях. Полученным результатам даны необходимые физически непротиворечивые объяснения. Приведены аналитические аппроксимации корреляции основных механических свойств материалов (твердость, пределы текучести и прочности) с параметрами их структуры (размер зерна).*

**Ключевые слова:** малые деформации, рассеянные повреждения, деградация механических свойств, параметр поврежденности, твердость, величина зерна, напряженность материала.

**Предварительные замечания.** В работах [1–3] приведены результаты исследований методом LM-твердости процессов накопления повреждений в металлических материалах в условиях статического и циклического нагружений вплоть до разрушения. Измерение твердости проводили при разных уровнях деформаций материала, находящегося в напряженном состоянии и после разгрузки. Полученные данные показывают, что имеет место заметное влияние степени его напряженности на регистрируемые при испытаниях числа твердости. Эти результаты имеют большое практическое значение, в частности, для совершенствования процедур оценки деградации материала путем сопоставления его твердости в исходном состоянии и полученной при измерениях на работающем оборудовании (например, на действующем трубопроводе).

Известно, что уровень эксплуатационной напряженности элементов большинства реальных конструкций ограничен коэффициентом безопасности, значения которого строго регламентированы соответствующими государственными и ведомственными стандартами. Так, значения коэффициента безопасности по нормам разных стран для сосудов и аппаратов, работающих под давлением, варьируются по пределу текучести от 1,50 (большинство стран) до 1,65 (нормы Польши), по пределу прочности от 2,35 (Британский стандарт) до 4,0 (Американский код). Следовательно, уровень расчетных напряжений, действующих в реальных изделиях, в полтора и более раз ниже предела текучести.

Таким образом, для реальных конструкций, особенно рассчитанных для эксплуатации в течение длительного времени, характерен относительно невы-

сокий уровень рабочих напряжений. Однако даже в этих условиях происходит интенсивная трансформация структуры. Так, границы зерен, которые, будучи сами по себе неравновесными дефектами, являются местом начала реализации основных механизмов эволюции деградационных процессов.

В зависимости от исходной структуры материала, в том числе от размеров зерна и условий нагружения, вклад сдвигов по поверхности границ зерен, приграничных и внутризеренных деформаций может изменяться в широком диапазоне: от 1 до 90% полной деформации [4].

Это, кстати, дает основание придать параметру, характеризующему поврежденность материала, конкретное физическое содержание в виде отношения суммы длин поврежденных границ зерен к длине всех границ в том же объеме материала, а при одноосном растяжении (сжатии) – к единице площади поперечного сечения [5]. При такой трактовке параметра поврежденности кристаллических материалов он должен зависеть в первую очередь от размеров зерен, их взаиморасположения, степени разориентировки в плоскости залегания и распределения деформаций по элементам поликристалла при его деформировании.

К независимым параметрам можно отнести также уровень напряженности материала, так как при нагружении даже в пределах упругости, т.е. в области, представляющей, как отмечалось выше, наибольший интерес при мониторинге несущей способности эксплуатируемых конструкций, происходят интенсивные изменения структуры материала – раскрытие пор, трещин и других подобных скрытых структурных несовершенств. Экспериментальному изучению этих актуальных для развития механики материалов вопросов посвящено настоящее исследование.

**Методика проведения испытаний и исследуемые материалы.** Исследование выполнено на конструкционных материалах различных классов: среднеуглеродистой стали 45, коррозионно-стойкой трубной стали 09Г2С и латуни Л63.

Плоские образцы ( $b \times h = 30 \times 80$  мм,  $l = 300$  мм) испытывали при статическом одноосном растяжении со скоростью нагружения 2 кН/мин. Системы нагружения и измерения деформаций, тарированные соответственно с помощью эталонного динамометра ДОС-100 и специального тарировочного устройства фирмы Instron, обеспечивали измерение регистрируемых в процессе испытаний параметров с точностью по нагрузке  $\pm 1$  Н, по перемещениям на базе 40 мм – до 0,001 мм. Начальные участки кривых деформаций исследуемых материалов показаны на рис. 1.

Образцы металла испытывали в исходном состоянии и после отжига по следующим режимам: сталь 45 – нагрев до  $T = 1123 \dots 1163$  К, выдержка в течение 6 ч, охлаждение с печью; сталь 09Г2С – нагрев до  $T = 1133 \dots 1163$  К, выдержка в течение 6 ч, охлаждение с печью; латунь Л63 – нагрев до  $T = 973 \dots 1023$  К, выдержка в течение 1,5 ч, охлаждение с печью. Структуру исходного материала и после отжига определяли по металлографическим шлифам после травления и полирования на микроскопе Zeiss Axiovert 40 MAT ( $\times 100$ ); методом секущих определяли средний размер зерна. Кроме того, структуру и свойства материала при деформациях 0,05; 0,10 и 0,15% и в разгруженном состоянии после каждого этапа деформирования контролиро-

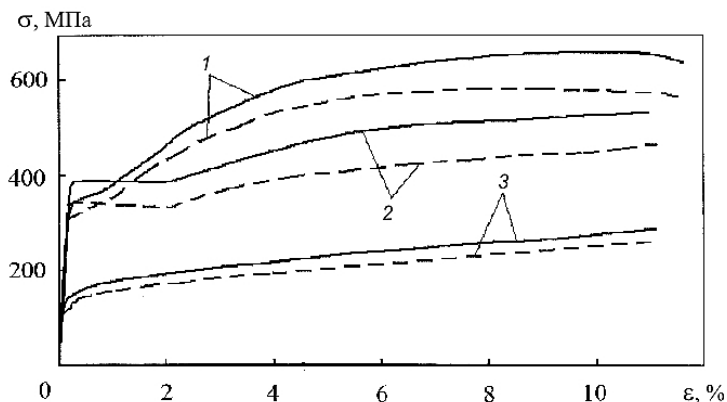


Рис. 1. Кривые деформаций сталей 45 (1), 09Г2С (2) и латуни Л63 (3) в исходном состоянии (сплошные линии) и после отжига (штриховые линии).

вали по твердости и параметрам рассеяния ее характеристик по данным 30 измерений в течение приблизительно 1 мин.

В качестве твердомера использовали портативный прибор COMPUTEST SC фирмы ERNST (Швейцария) с автоматической регистрацией накопления и обработки результатов измерений и выводом данных на дисплей в виде характеристик твердости по Бринеллю, Виккерсу или Роквеллу (шкалы А, В и С).

Критерием поврежденности служил уровень рассеянных повреждений, которому в соответствие ставилась величина, обратно пропорциональная коэффициенту  $m$ , характеризующему в теории Вейбулла степень однородности материала. Применительно к испытаниям на твердость выражение для  $m$  имеет вид

$$m = 0,4343d_n \left[ \frac{l}{n-l} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где параметр  $d_n$  определяют в зависимости от количества  $n$  измерений;  $H_i$  – значение твердости по  $i$ -му измерению;  $\overline{\lg H}$  – среднее значение логарифма твердости по результатам  $n$  измерений [6].

Структура испытываемых материалов показана на рис. 2. Как видно, в исходном состоянии стали имеют ферритно-перлитную структуру с небольшим преимуществом перлита в стали 45. Зерна перлита находятся в ферритной матрице. Наблюдаются небольшие, возможно шлаковые, включения. Структура стали 45 гетерогенная, грубозернистая с неравномерным распределением зерен, имеющих разный размер. У стали 09Г2С перлит мелкозернистый, также неравномерно распределенный по ферритной матрице. Структура латуни в исходном состоянии состоит из  $\alpha$ -кристаллов сравнительно небольших размеров и единичных включений  $\gamma$ -кристаллов. В результате отжига структура материалов качественно не изменяется. Она становится однороднее, зерна имеют более равновесную и правильную форму, их размеры, особенно у латуни, заметно увеличены.

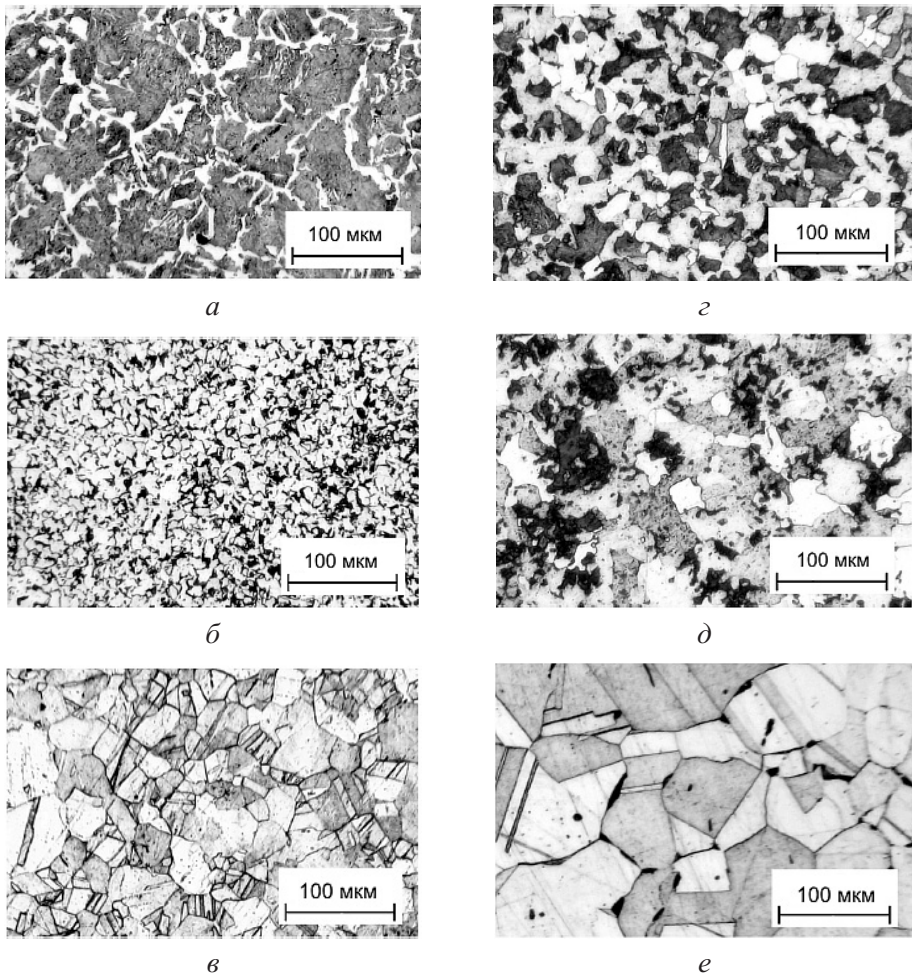


Рис. 2. Структура материалов ( $\times 100$ ): *a, в, д* – соответственно стали 45, 09Г2С и латунь Л63 в исходном состоянии; *б, з, е* – после отжига.

Характеристики основных механических свойств материалов и средние размеры зерен в исходном состоянии (над чертой) и после отжига (под чертой) приведены в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, отжиг приводит к изменению свойств материала: к снижению его прочности и твердости с одновременным увеличением размеров зерна и повышением пластичности. Величины этих изменений в сопоставлении с соответствующими характеристиками в исходном состоянии обозначены в табл. 1 параметром  $\omega_i$ :

$$\omega_i = \frac{\Delta K_i}{K_i} = \frac{(K_i^I - K_i^{II})}{K_i^I}, \quad (2)$$

где  $K_i^I, K_i^{II}$  – характеристики  $i$ -го свойства материала ( $d, H, \sigma_{0,2}, \sigma_B, \varepsilon_B$ ) в исходном состоянии и после отжига соответственно.

Т а б л и ц а 1

**Характеристики механических свойств металлов и средние размеры зерен**

Материал	$d$ , мкм	$\omega_d$	$H$	$\omega_H$	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\omega_{\sigma_{0,2}}$	$\sigma_B$ , МПа	$\omega_{\sigma_B}$	$\varepsilon_B$ , %	$\omega_{\varepsilon_B}$	$\bar{\omega}$
Сталь 45	$\frac{12}{22}$	0,833	$\frac{89}{79}$	0,112	$\frac{362}{327}$	0,097	$\frac{634}{561}$	0,115	$\frac{16}{20}$	0,25	0,106
Сталь 09Г2С	$\frac{10}{19}$	0,900	$\frac{83}{73}$	0,200	$\frac{383}{335}$	0,125	$\frac{577}{465}$	0,124	$\frac{21}{28}$	0,33	0,123
Латунь Л63	$\frac{24}{57}$	1,375	$\frac{88}{66}$	0,250	$\frac{140}{116}$	0,171	$\frac{320}{265}$	0,182	$\frac{33}{55}$	0,45	0,201

**Примечание.** Твердость сталей определена по шкале Роквелла HRB, латуни – по шкале Виккерса HV.

Анализ этих данных показывает, что параметр  $\omega_i$  для твердости ( $\omega_H$ ), пре-делов текучести ( $\omega_{\sigma_{0,2}}$ ) и прочности ( $\omega_{\sigma_B}$ ) у сталей и латуни мало отличается от среднего значения

$$\bar{\omega} = \frac{(\omega_H + \omega_{\sigma_{0,2}} + \omega_{\sigma_B})}{3}, \quad (3)$$

равного 0,106 для стали 45, 0,123 для стали 09Г2С и 0,201 для латуни, где рассеяние параметров  $\omega_i$  по отношению к  $\bar{\omega}$  более заметно.

**Связь механических свойств металлических материалов с размером зерна.** Степень влияния структурного состояния материала на механические свойства зависит от характера термомеханических воздействий в процессе изготовления реальных деталей и параметров сформировавшейся при этом структуры, важнейшими из которых являются размер зерна и состояние границ зерен. Корреляция этих параметров с характеристиками прочности (пределами текучести и прочности) может быть описана, как известно, уравнением Холла–Петча

$$\sigma = \alpha + \beta d^{-1/2}, \quad (4)$$

в котором влияние размера зерна отражено величиной  $d^{-1/2}$  ( $d$  – средний размер зерна), а степень этого влияния – параметрами  $\alpha$  и  $\beta$ , имеющими четкий физический смысл:  $\alpha$  – напряжение “трения”, характеризует сопротивление пластическому деформированию внутри зерен,  $\beta$  – способность границ зерен передавать деформацию от зерна к зерну, т.е. сопротивление на их границах.

Принято считать, что значения  $\alpha$  и  $\beta$  практически не изменяются при малых деформациях, а после перехода к однородной деформации (на пределе текучести)  $\alpha$  может как уменьшаться, так и незначительно увеличиваться, а  $\beta$  при дальнейшем росте деформации, как правило, увеличивается. При известных зависимостях  $\alpha = \varphi_1(\varepsilon)$  и  $\beta = \varphi_2(\varepsilon)$  уравнение Холла–Петча дает возможность описать влияние размера зерна на всей области однородной деформации.

Заметим при этом, что в хрупких материалах величина зерна является доминирующим структурным параметром, а в вязких – заметное влияние могут оказывать форма зерна, размеры включений, наличие твердых и мягких фаз, их флуктуаций и т.п. Значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  для рассматриваемых (предварительно недеформированных) материалов, рассчитанные по характеристикам их прочности в исходном состоянии и после отжига, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

**Значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  для рассматриваемых материалов при определении по  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$**

Материал	Коэффициенты $\alpha$ и $\beta$ в уравнении Холла–Петча	
	$\alpha$	$\beta$
Сталь 45	$\frac{235}{370}$	$\frac{437}{912}$
Сталь 09Г2С	$\frac{209}{173}$	$\frac{551}{1287}$
Латунь Л63	$\frac{72}{145}$	$\frac{333}{806}$

**Примечание.** Над чертой приведены данные для  $\sigma_{0,2}$ , под чертой – для  $\sigma_B$ .

Из данных табл. 2 видно, что для стали 45 и латуни Л63 при повышении напряжений от предела текучести до предела прочности коэффициент  $\alpha$  возрастает, для стали 09Г2С он снижается. В то же время коэффициент  $\beta$  для всех материалов увеличивается приблизительно в 1,5 (латунь) и 2 (стали) раза. Это связано с влиянием границ субзерен или хрупких включений, а также с различием параметров деформирования, характеризующих процессы упрочнения материалов на отдельных стадиях (рис. 1). Так, если у стали 09Г2С начало развития пластических деформаций сопровождается образованием площадки текучести, а упрочнение начинается при деформациях около 2%, то у стали 45 площадка текучести выражена нечетко и заканчивается при деформациях порядка 0,5...0,6%, у латуни она вообще отсутствует. Интенсивность деформационного упрочнения исследуемых материалов заметно различается, при этом упрочнение сталей описывается степенной функцией, латуни – практически линейной. Отношение их пределов прочности  $\sigma_B$  к пределам текучести  $\sigma_{0,2}$  также заметно различается: для стали 09Г2С  $\sigma_B/\sigma_{0,2} = 1,5$ , для стали 45 – 1,8, для латуни Л63 – 2,3.

Несмотря на отмеченные выше качественные и количественные различия в структуре и свойствах испытанных материалов, полученные для них значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  в уравнении (4) как параметров, отражающих особенности процессов, протекающих при деформировании на уровне зерна, непротиворечивы, а выбор аргумента в виде  $d^{-1/2}$  – физически обоснован, что позволяет привести зависимость  $\sigma(d)$  к линейной функции. Это дает основание использовать величину  $d^{-1/2}$  в качестве представительного аргумента в других моделях, описывающих влияние одного из основных струк-

турных факторов поликристаллических материалов. Так, анализ данных, приведенных в табл. 1, позволяет построить модель, на основе которой можно прогнозировать свойства материала после термической обработки, приводящей к изменению размера зерна.

Действительно, если характеристики механических свойств и размер зерна какого-либо материала известны, то характеристики механических свойств этого материала с другим размером зерна можно определить, используя условие корреляции в виде

$$\omega = \bar{\omega} \cdot \omega_d^{-1/2}. \quad (5)$$

Значения  $\bar{\omega}$  и  $\omega_d$  для каждого из исследуемых материалов приведены в табл. 1.

На основании (2) и (5) получим

$$\frac{(K_i^I - K_i^II)}{K_i^I} = \bar{\omega} \cdot \omega_d^{-1/2},$$

откуда находим

$$K_i^II = K_i^I (1 - \bar{\omega} \omega_d^{-1/2}). \quad (6)$$

Результаты расчетов, приведенные в табл. 3, показывают, что прогнозированные значения ( $H^P$ ,  $\sigma_{0,2}^P$ ,  $\sigma_B^P$ ) отличаются от экспериментальных ( $H^3$ ,  $\sigma_{0,2}^3$ ,  $\sigma_B^3$ ) на величину, не превышающую разброс регистрируемых данных при механических испытаниях материалов на стандартном оборудовании.

Т а б л и ц а 3

Экспериментальные и расчетные значения характеристик твердости и прочности материалов

Материал	$H^3$ , МПа	$H^P$ , МПа	$\Delta H$ , %	$\sigma_{0,2}^3$ , МПа	$\sigma_{0,2}^P$ , МПа	$\Delta \sigma_{0,2}$ , %	$\sigma_B^3$ , МПа	$\sigma_B^P$ , МПа	$\Delta \sigma_B$ , %
Сталь 45	79	78,6	-0,50	327	320,0	-2,14	560	561,0	-0,18
Сталь 9Г2С	73	70,7	-2,78	335	336,7	+0,50	465	492,0	+5,72
Латунь Л63	64	69,3	+8,21	116	110,2	-5,00	265	251,2	-0,05

Для латуни максимальное расхождение по твердости составляет 8,21%, по пределу текучести – 5,0%, для стали 09Г2С по пределу прочности – 5,72%.

**Исследование процесса накопления рассеянных повреждений.** Практически все реально существующие в природе твердые тела в большей или меньшей степени неоднородны на разных масштабных уровнях. Основную причину неоднородности поликристаллических материалов обычно связывают с параметрами их структуры и в первую очередь с размерами зерен, их геометрией и состоянием приповерхностных (межзеренных) зон. Под влиянием этих и, возможно, других факторов увеличивается взаимодействие между

элементами структуры материала, растет ее поврежденность, а следовательно, и неоднородность, что приводит к рассеянию его микро- и макросвойств.

Регрессивный анализ статистических данных, полученных при обработке результатов механических испытаний материалов, позволяет установить соответствующие законы распределения и на их основе построить феноменологические модели, описывающие процессы накопления рассеянных повреждений в материале при термомеханических и других воздействиях. Влияние на кинетику структурных преобразований различных факторов наиболее полно проявляется на результатах испытаний материалов методом ЛМ-твёрдости, в котором в качестве параметра, характеризующего состояние структуры, принят коэффициент гомогенности  $m$ , т.е. параметр ее однородности.

Показательными в этом отношении являются результаты работы [7], подтверждающие стадийность процесса накопления повреждений при статическом растяжении в оценке уровнем рассеяния характеристик упругости ( $\mu$ ,  $E$ ) и прочности ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ). Более высокий уровень их рассеяния наблюдается на начальных стадиях деформирования (до предела текучести), чем при развитых пластических деформациях, что связано с различной природой и механизмами формирования повреждений (дефектов) на разных стадиях.

Проявляются явные преимущества метода ЛМ-твёрдости, наиболее чувствительного к повреждениям различной природы, и следовательно, интегрально отражающим степень деградации на любой стадии наработки, поскольку все стадии претерпевает материал в зоне индентора при его внедрении.

Более того, метод ЛМ-твёрдости позволяет оценить влияние на процесс накопления повреждений пока мало изученного фактора – степень напряженности материала [8]. При исследовании, результаты которого обсуждаются ниже, большое внимание уделено влиянию именно этого фактора.

Полученные данные об изменении твёрдости и коэффициентов гомогенности в процессе деформирования материалов в исходном состоянии и после отжига показаны на рис. 3 и 4. Для оценки влияния степени напряженности материала на показания твердомера измерения проводили под нагрузкой и в разгруженном состоянии.

Как видно из рис. 3, характеристики твёрдости как при малых, так и при развитых деформациях очень мало изменяются в процессе деформирования. Рост твёрдости латуни более заметен, особенно в зоне больших деформаций. При этом для отожженных материалов кривые  $H(\varepsilon)$  располагаются ниже, чем для материалов в исходном состоянии, на 3...4% (сталь 45), на 10...12% (сталь 09Г2С) и приблизительно на 20% (латунь). Показатели твёрдости в нагруженном состоянии (одноосное растяжение) у всех материалов ниже, чем в ненагруженном.

Низкая чувствительность твёрдости к структурным трансформациям в материале при деформировании подтверждает уже сложившееся мнение специалистов о том, что твёрдость является характеристикой материала, слабо чувствительной к изменению его структуры, и поэтому плохо коррелирует со степенью его поврежденности. К более чувствительным характеристикам, судя по данным, приведенным на рис. 4, следует отнести коэффициент гомогенности  $m$ , высокий темп снижения которого, особенно при малых деформациях, свидетельствует о его хорошей корреляции с уровнем накоп-



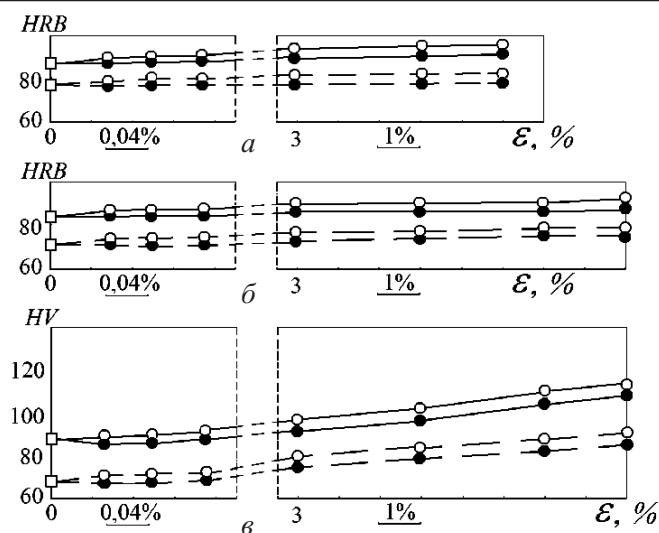


Рис. 3. Зависимость твердости сталей 45 (а), 09Г2С (б) и латуни Л63 (в) от деформации. (Здесь и на рис. 4: верхние две кривые – исходное состояние материала, нижние две – после отжига; □ – материал недеформированный; ○ – после разгрузки деформированного образца; ● – при нагруженном образце.)

ленных повреждений. Подтверждается также более высокая чувствительность к изменению структуры коэффициента  $m$ , рассчитанного по числам твердости, полученным при испытаниях напряженного материала. Это важнейшее обстоятельство, на которое обычно мало обращают внимание, положено в основу предложенной процедуры оценки степени поврежденности материала несущих элементов изделий в процессе их эксплуатации [9].

Отжиг, как видно из рис. 4, приблизительно на одну треть увеличивает поврежденность материалов в исходном состоянии. Темп роста поврежденности (снижение значения коэффициента гомогенности  $m$ ) при деформировании увеличивается, а при напряжениях, близких к пределу текучести стали 45 и латуни, процесс накопления повреждений останавливается. У стали 09Г2С этот процесс продолжает развиваться и при больших деформациях. Такое поведение исследуемых материалов связано, по-видимому, с особенностями протекания внутризеренных и, в меньшей степени, межзеренных сдвигов. Более того, границы зерен в поликристаллах тормозят развитие внутризеренных механизмов деформации.

Деформация материалов при низких уровнях напряжений, в том числе и на уровне площадки текучести, реализуется, главным образом, за счет внутризеренных сдвигов, приводящих к изменению формы зерен с образованием текстуры. Заметно влияние на эти процессы приграничной деформации и перестройки границ, сопровождающихся разориентировкой соседних кристаллов (зерен), их дроблением, выделением новых фаз и т.п. Это в совокупности с большими деформациями на уровне размера зерна приводит к искажению структуры и необратимому изменению плотности (“разрыхлению”) материала, т.е. деградаци по механизму накопления рассеянных повреждений. Зерна поликристалла претерпевают двойникование, а линии сдвигов трансформируются в микро- и макротрещины.

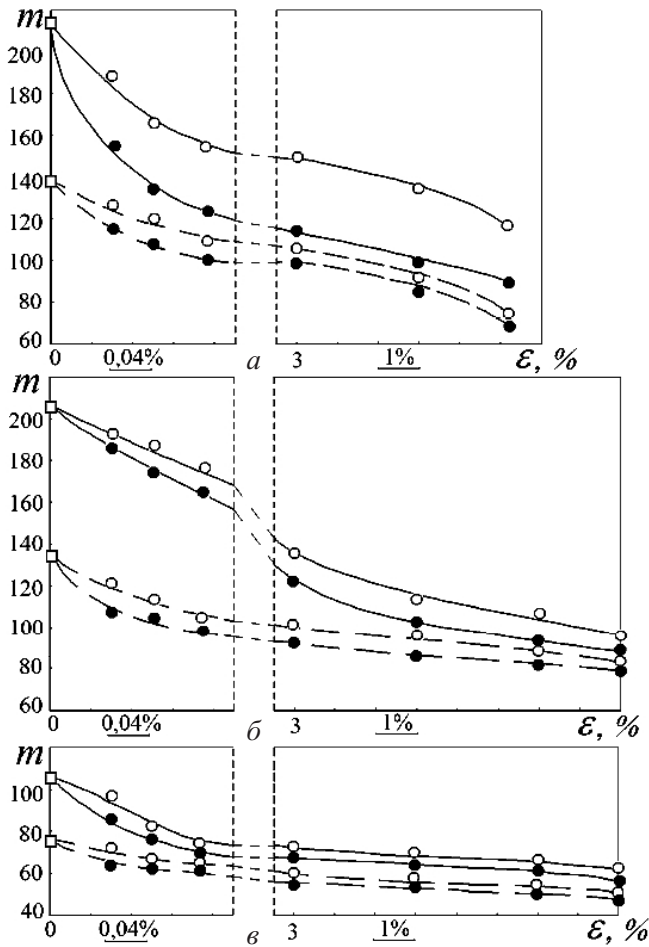


Рис. 4. Зависимость коэффициента гомогенности сталей 45 (а), 09Г2С (б) и латуни Л63 (в) от деформации.

Указанные сложные процессы сопровождают деформирование всех поликристаллов и проявляются в большей или меньшей мере в зависимости от природы материала и его исходного структурного состояния.

Сталь 45 с разупрочненной структурой имеет сложную геометрию зерен с большим разбросом их размеров и неравномерностью распределения по объему. Такая структура создает сложные условия совместного деформирования ее элементов с нарушением когезивных связей. При этом происходит интенсивный рост повреждений в процессе взаимной адаптации зерен, особенно на первых этапах нагружения. Большую роль играют повреждения, возникшие на этапе предыдущего деформирования. В дальнейшем интенсивность накопления повреждений снижается, особенно в напряженном материале (рис. 3).

Структура стали 09Г2С еще более неоднородная, с хаотическим распределением зерен, что создает благоприятные условия для зернограничного проскальзывания по типу “вязкого трения”, т.е. легкого скольжения с образованием площадки текучести длиной, соответствующей около 2% де-

формации. Этим можно объяснить практически линейный закон накопления повреждений у стали, в том числе в напряженном состоянии.

Зародившиеся трещины (повреждения) в сталях зависят от длины полос скольжения, способствующих появлению зон концентрации напряжений, а также локализации по границам зерен низкопрочных избыточных фаз, которые являются основной причиной развития межзеренного разрушения.

Структура латуни – однофазная. Зерна имеют сравнительно небольшие размеры. Отжиг приводит к увеличению размеров более чем в два раза. Тем не менее это не вызывает, как у сталей, качественных изменений закономерностей накопления повреждений вплоть до предела текучести. Это можно объяснить тем, что при росте размеров зерен в латуни, благодаря увеличению плотности прилегания которых создаются условия на границах, обеспечивающие реализацию их взаимодействия “в регулярном” режиме – только за счет внутризеренных сдвигов, без поворотов и дробления зерен, т.е. без образования дополнительных очагов новых повреждений.

Заметим, что аналогичные условия на структурном уровне выполняются при больших деформациях отожженной латуни и стали 09Г2С (рис. 3) в исходном состоянии и после отжига.

Приведенный выше анализ возможных механизмов деформирования материалов и накопления рассеянных повреждений, особенно при малых деформациях, нельзя считать исчерпывающими, тем более, что, судя по данным литературных источников, среди специалистов пока еще не сформировался единый взгляд на эти механизмы. Поэтому авторы не акцентировали внимание на влиянии других факторов: выделении вторичных фаз, слиянии границ зерен при их росте, взаимовлиянии зернопограничного проскальзывания с внутризеренной деформацией и перестройкой границ при слиянии дефектов, тенденции их миграции до равновесного положения, влиянии на эти процессы “зубчатости” границ и др. Следует отметить, что в настоящее время, судя по известным литературным источникам, многие традиционные представления по проблемам микро- и макропластичности, а также физическим и механическим аспектам кинетики накопления рассеянных повреждений ставятся под сомнение.

К сожалению, большинство выполненных работ относится к исследованиям, касающимся построения различных моделей механики материалов, в том числе разрушения на развитых стадиях деформирования. Предложенные модели, как правило, не имеют достаточного физического и экспериментального обоснования отправных гипотез, постулатов и допущений. Актуальность и, более того, необходимость решения этого вопроса в области материаловедения и механики материалов при создании эффективных алгоритмов мониторинга несущей способности действующих конструкций очевидна.

**Заключение.** Описаны базовый эксперимент и соответствующая методика исследования структуры и механических свойств сталей 45, 09Г2С и латуни Л63 в исходном состоянии и после термомеханических воздействий (отжиг). Показана эффективность использования метода ЛМ-твердости для изучения кинетики накопления повреждений в исследованных поликристаллических материалах при деформировании.

На основе новых экспериментальных результатов даны качественные и количественные оценки влияния размера зерна и степени напряженности материала на кинетику накопления повреждений на разных стадиях деформирования. Установлено, что наиболее интенсивно этот процесс протекает в зоне малых упругопластических деформаций, замедляясь по мере приближения к пределу текучести.

Показано, что отжиг повышает повреждаемость исследованных материалов в исходном состоянии и темп накопления повреждений при деформировании с одновременным увеличением размера зерна и пластичности, снижением твердости и прочности. Объясняется изменение механических и структурных параметров материалов в уравнениях типа Холла–Петча и предложениях, сделанных авторами относительно отжига металла.

Установлено влияние напряженности металла на регистрируемые при испытаниях показатели его твердости и в значительно большей степени на темп накопления повреждений. Учет этого обстоятельства дает возможность повысить степень точности проводимых расчетов при мониторинге остаточного ресурса работающего оборудования по уровню накопленных в материале рассеянных повреждений, определяемых, например, методом ЛМ-твердости.

Работа выполнена при поддержке комплексной программы НАН Украины “Ресурс” (проект 9.5) и ГФФИ Украины (проект Ф40.7/010).

## Резюме

Досліджено процеси накопичення пошкоджень при статичному деформуванні сталей 45, 09Г2С і латуні Л63 у вихідному стані й після відпау на “зерно”. Обговорюються нові експериментальні результати дослідження кінетики накопичення пошкоджень при деформуванні полікристалічних матеріалів, які мають різну природу й розміри зерен, у тому числі в розвантаженому стані та під напруженням при малих і дуже малих (0,05...0,15%) деформаціях. Отримані результати фізично обґрунтовані. Приведено аналітичні апроксимації кореляції основних механічних властивостей матеріалів (твердість, границі текучості й міцності) із параметрами їх структури (розмір зерна).

1. Патент України № 52107А, МКИ 7 G 01 N 3/00, G 01 N 3/40. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “ЛМ-метод тведості” / А. О. Лебедєв, М. Р. Музика, Н. Л. Волчек. – Чинний з 15.01.03. Бюл. № 1.
2. *Lebedev A. A., Muzyka N. R., Volchek N. L., and Nedoseka S. A.* Monitoring of current state of pipe metal in active gas pipelines. Experimental method and results // *Strength Mater.* – 2003. – **35**, No. 2. – P. 122 – 127.
3. *Lebedev A. A., Makovetskii I. V., Muzyka N. R., and Shvets V. P.* A study of deformation and damage in 10GNMFA steel under low-cycle loading // *Ibid.* – 2008. – **40**, No. 2. – P. 163 – 167.
4. *Кайбышев О. А., Вагнер Р. З.* Границы зерен и свойства металлов. – М.: Металлургия, 1987. – 214 с.

5. *Арутюнян Р.* Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов. – СПб: Изд-во СПб ун-та, 2004. – 252 с.
6. *Lebedev A. A., Muzyka N. R., and Volchek N. L.* Determination of damage accumulated in structural materials by the parameters of scatter of their hardness characteristics // *Strength Mater.* – 2002. – **34**, No. 4, 317 – 321.
7. *Lebedev A. A., Makovetskii I. V., Muzyka N. R., et al.* Assessment of damage level in materials by the scatter of elastic characteristics and static strength // *Ibid.* – 2006. – **38**, No. 2. – P. 109 – 116.
8. *Lebedev A. A. and Shvets V. P.* Assessment of damage in structural steels by the parameters of scatter of hardness characteristics in loaded and unloaded states // *Ibid.* – 2008. – **40**, No. 3. – P. 302 – 307.
9. *Пат. України 48298.* Спосіб проведення попередньої технічної експертизи пошкоджуваності металу конструкції / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка. – Чинний з 10.03.2011.

Поступила 04. 02. 2011