

Оценка повреждаемости подвергнутого рекристаллизации металла при последующем деформировании

Н. Р. Музыка, В. П. Швец, И. В. Маковецкий

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

Показана возможность использования метода LM-твёрдости для оценки состояния металла при термосиловой обработке. Определена степень влияния начальной пластической деформации металла на его поврежденность в зависимости от уровня деформации при последующем деформировании после рекристаллизации по данным о рассеянии массовых значений характеристик твёрдости. Показано, что в предварительно деформированном металле, прошедшем рекристаллизацию, с увеличением повторной пластической деформации одновременно с уменьшением размера зерна и ростом твёрдости происходит накопление поврежденных структуры металла. Предварительная пластическая деформация до отжига существенно влияет на накопление повреждений в металле: чем выше ее уровень до отжига, тем активнее происходит накопление повреждений при деформировании образцов металла после отжига.

Ключевые слова: предварительное деформирование, рекристаллизация, средний размер зерна, повторное деформирование, твёрдость, рассеяние характеристик твёрдости, повреждаемость.

Введение. Многие изделия изготавливают из листового металла путем холодной пластической деформации, в процессе которой повышается плотность дефектов кристаллической решетки, изменяются форма и ориентация зерен, они вытягиваются в направлении главной деформации, вследствие чего изменяются структура металла и его свойства.

Иногда металл упрочнен настолько, что при дальнейшем деформировании до достижения заданной степени деформации может произойти разрушение. Для приведения металла в равновесное структурное состояние, снятия наклепа, уменьшения внутренних напряжений, неоднородности структуры и твёрдости, а также повышения прочности, пластичности и ударной вязкости процесс изготовления изделия разбивается на ряд этапов. В промежутках между ними металл подвергается термообработке, в качестве которой широко применяется рекристаллизационный отжиг, в результате чего получаем металл с новой структурой, и он опять может быть подвергнут циклу деформирования [1]. С целью обеспечения качества изделия необходимо оценить степень поврежденности структуры такого металла, что позволит установить его пригодность для использования как “заготовку” при последующем пластическом деформировании, например при выполнении технологических операций вытяжки, гибки, вальцовки и др.

Данные об изменении физико-механических свойств металла наиболее просто определяются неразрушающим методом твёрдости [2, 3]. Однако этот метод, несмотря на доступность, простоту и другие качества, обладает низкой чувствительностью к структурному состоянию металла, по изменению которой оценивается степень его поврежденности [4]. Провести такую оценку

можно с помощью подхода, основанного на методе ЛМ-твердости [5], в котором как параметр состояния металла используется степень рассеяния механических характеристик, в том числе твердости, при массовых испытаниях [6]. Согласно методу, для установления взаимосвязи поврежденности металла с состоянием его структуры в качестве структурно-чувствительного параметра принят коэффициент гомогенности Вейбулла m [7]. Метод апробирован на конструкционных материалах различного назначения, работающих в условиях статического и циклического нагружения [8–11].

Полученные положительные экспериментальные результаты о возможности оценки поврежденности материалов методом ЛМ-твердости определяют проведение дальнейших исследований с целью расширения применимости метода для диагностики металла, подвергнутого термомеханической обработке.

Методика и результаты испытаний. Экспериментальные исследования проводили на сплошных плоских образцах длиной $l = 300$ мм, шириной $b = 30$ мм и высотой $h = 8$ мм, изготовленных из качественной углеродистой стали 45, коррозионно-стойкой стали 09Г2С и латуни Л63, механические свойства которых приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Механические свойства материалов образцов в исходном состоянии

Материал	Твердость	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Латунь Л63	88,0 HV	320	140	38
Сталь 45	89,5 HRB	634	362	16
Сталь 09Г2С	82,9 HRB	577	383	21

Образцы исходного материала подвергали холодному пластическому деформированию до “критических” при рекристаллизации уровней остаточной деформации 3, 6, 9 и 11%, в результате чего уменьшается размер зерен, от которого значительно зависят физические свойства металлического образца (рис. 1,б–3,б). Полученные образцы термически обрабатывали по такому режиму: нагрев до температуры, превышающей температуру отжига для снятия напряжений, с последующей выдержкой при этой температуре [12]. Температурные режимы в зависимости от марки металла составляют: для стали 45 – $T = 1123 \dots 1163$ К, выдержка 6 ч, охлаждение с печью до $T = 773$ К, затем на воздухе; для стали 09Г2С – $T = 1133 \dots 1153$ К, выдержка 6 ч, охлаждение с печью; для латуни Л63 – $T = 973 \dots 1023$ К, выдержка 1,5 ч, охлаждение с печью до $T = 300$ К, затем на воздухе. Скорость нагрева достигает 5 К/мин, скорость охлаждения – 110 К/ч (при этом учитывается конструкция печи).

Механические свойства металлов после отжига таковы: $\sigma_B = 561$ МПа, $\sigma_{0,2} = 327$ МПа (сталь 45); $\sigma_B = 465$ МПа, $\sigma_{0,2} = 331$ МПа (сталь 09Г2С); $\sigma_B = 263$ МПа, $\sigma_{0,2} = 97$ МПа (латунь Л63).

Полученные структуры образцов из сталей 45, 09Г2С и латуни Л63 приведены на рис. 1–3.

Из рис. 1,б–3,б видно, что с увеличением степени первоначальной пластической деформации исходное зерно деформируется, не измельчаясь.

В процессе отжига с течением времени происходит замена старой структуры новой, в результате чего средний размер зерна металла увеличивается (рис. 1, в–з, в).

В табл. 2 представлены средние размеры зерен исследуемых материалов. Наиболее крупное зерно получено при остаточном удлинении 3...6%. Критическая степень деформации для сталей 45 и 09Г2С составляет 3%, для латуни Л63 – 6%.

Т а б л и ц а 2

Трансформация зерен в результате деформации и отжига исследуемых материалов (средний размер зерна, мкм)

Материал	Исходное состояние	После отжига	ε , %, равное			
			3	6	9	11
Латунь Л63	24	57	$\frac{35}{52}$	$\frac{50}{55}$	$\frac{36}{40}$	$\frac{34}{37}$
			Сталь 09Г2С	10	19	$\frac{12}{19}$
Сталь 45	12	22	$\frac{17}{20}$	$\frac{16}{19}$	$\frac{13}{17}$	$\frac{12}{16}$

Примечание. Здесь и в табл. 3 над чертой приведены данные, полученные до отжига материала, под чертой – после отжига.

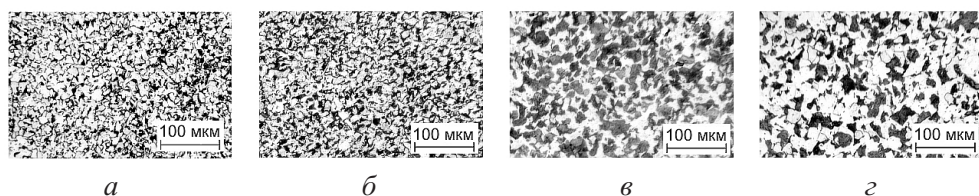


Рис. 1. Трансформация структуры стали 45. (Здесь и на рис. 2, 3: а – исходное состояние; б – после деформирования; в – отжиг после деформирования; з – последующее деформирование после отжига.)

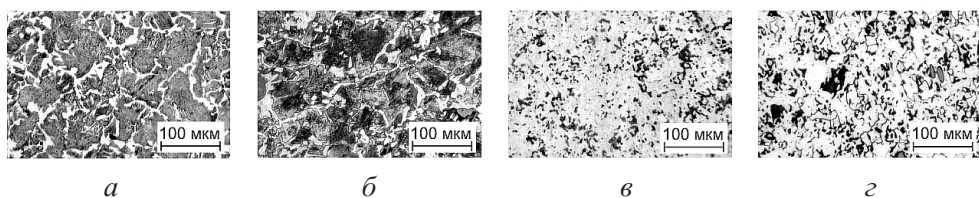


Рис. 2. Трансформация структуры стали 09Г2С.

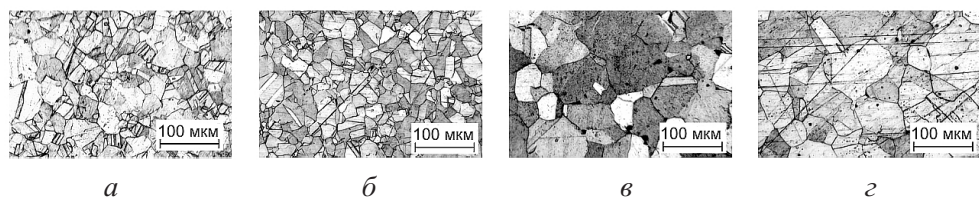


Рис. 3. Трансформация структуры латуни Л63.

После отжига образцы подвергали повторному статическому растяжению до уровней деформации 3, 6, 9 и 11%. С увеличением уровня деформации металла, подвергнутого рекристаллизационному отжигу, размер зерна уменьшается, однако он существенно выше исходного (рис. 1,2–3,2).

При повторном статическом растяжении до указанных уровней деформации выполняли по 30 измерений твердости образцов под нагрузкой и без таковой. По результатам измерений методом LM-твердости оценивали состояние поврежденности металла.

Данные о состоянии предварительно деформированных, а затем отожженных образцов из сталей 45, 09Г2С и латуни Л63 до и после повторного деформирования до одного и того же уровня в оценке значениями твердости *HRB* и *HV* и коэффициентом гомогенности *m* приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Изменение твердости и коэффициента гомогенности исследуемых материалов в зависимости от термдеформированного состояния

Материал	Характеристика	В состоянии поставки	После отжига	ε , %, равное				
				3,0	6,0	8,3	9,0	11,0
Сталь 45	<i>HRB</i>	89,5	78,9	$\frac{80,4}{83,9}$	$\frac{80,8}{84,3}$	$\frac{80,9}{85,5}$	–	–
	<i>m</i>	215,0	139,1	$\frac{90,5}{80,4}$	$\frac{85,3}{65,5}$	$\frac{82,3}{56,2}$	–	–
Сталь 09Г2С	<i>HRB</i>	82,9	74,2	$\frac{72,4}{79,8}$	$\frac{72,5}{80,9}$	–	$\frac{72,9}{82,3}$	$\frac{72,9}{82,9}$
	<i>m</i>	205,9	124,5	$\frac{147,4}{132,3}$	$\frac{138,8}{121,9}$	–	$\frac{127,6}{106,9}$	$\frac{118,3}{95,7}$
Латунь Л63	<i>HV</i>	88,0	66,0	$\frac{69,0}{82,0}$	$\frac{70,0}{90,0}$	–	$\frac{71,0}{96,0}$	$\frac{71,0}{104,0}$
	<i>m</i>	87,9	54,4	$\frac{50,4}{45,6}$	$\frac{49,1}{39,8}$	–	$\frac{45,9}{32,2}$	$\frac{43,2}{24,8}$

На рис. 4–6 представлены экспериментальные данные по твердости, а на рис. 7–9 по коэффициенту гомогенности *m* для рассматриваемых материалов под нагрузкой и в разгруженном состоянии. Видно, что последующая пластическая деформация после отжига приводит к увеличению значений твердости, при этом существенное влияние оказывает уровень предварительной пластической деформации. Так, при деформировании до наибольшей деформации твердость стали 45 увеличивается на 5,7%, стали 09Г2С – на 13,9%, латуни Л63 – на 33,8% по сравнению со значениями твердости до повторного деформирования.

Из представленных диаграмм изменения твердости трудно сделать заключение об улучшении или ухудшении состояния материала по степени его поврежденности вследствие накопления рассеянных повреждений при деформировании.

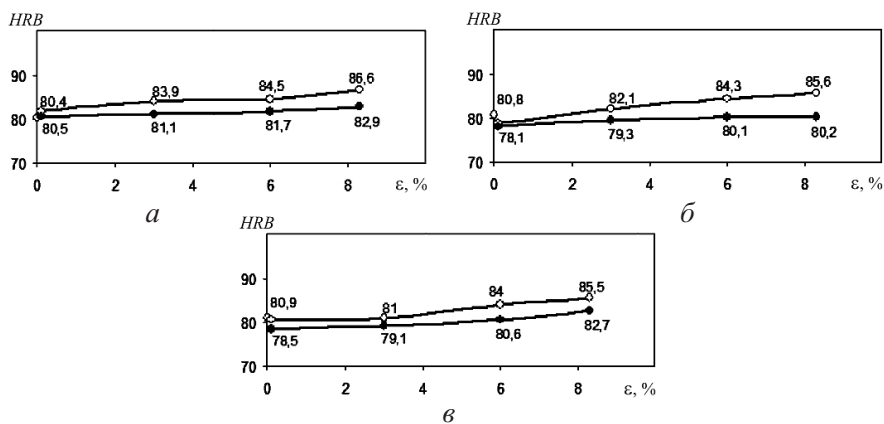


Рис. 4. Изменение твердости стали 45, предварительно пластически деформированной при одноосном растяжении (*a* – $\epsilon = 3\%$; *б* – $\epsilon = 6\%$; *в* – $\epsilon = 9\%$) и прошедшей рекристаллизацию в зависимости от повторной пластической деформации. (Здесь и на рис. 5–9: темные точки – экспериментальные данные для материала под нагрузкой, светлые – то же без нагрузки.)

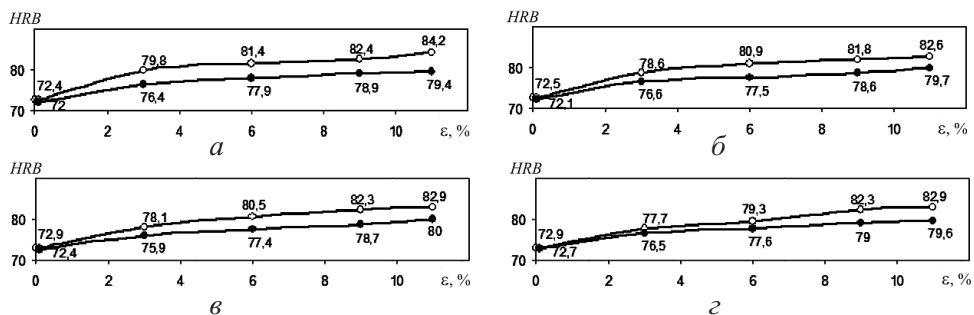


Рис. 5. Изменение твердости стали 09Г2С, предварительно пластически деформированной при одноосном растяжении (*a* – $\epsilon = 3\%$; *б* – $\epsilon = 6\%$; *в* – $\epsilon = 9\%$; *г* – $\epsilon = 11\%$) и прошедшей рекристаллизацию в зависимости от повторной пластической деформации.

Примеры взаимосвязи между параметром гомогенности m и изменением структуры металла, обусловленной его поврежденностью, в зависимости от уровня пластической деформации после отжига приведены на рис. 7–9. Видно, что параметр m устойчиво коррелирует с поврежденностью металла. Его низкие значения характеризуют повышенный уровень накопления повреждений после рекристаллизационного отжига предварительно пластически деформированного металла. Подобный характер кривых поврежденности металла в оценке параметром гомогенности m отмечен ранее [13] при оценке влияния состояния металла под нагрузкой и без на его способность к накоплению повреждений при деформировании. Заметим, что металл в исходном (неповрежденном) состоянии характеризуется определенной величиной коэффициента гомогенности m . Это обусловлено начальной поврежденностью структуры металла из-за несовершенства технологии изготовления.

На значения коэффициента m оказывает заметное влияние уровень предварительной пластической деформации. Представленные в табл. 2 и 3 результаты металлографических исследований и оценки поврежденности металла показывают, что размер зерна недеформированного металла в состоянии

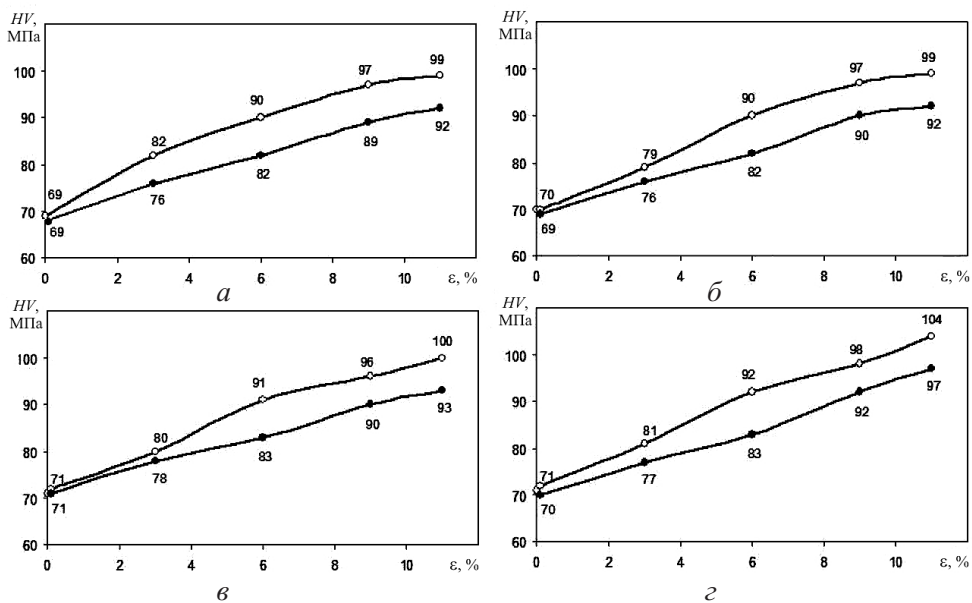


Рис. 6. Изменение твердости латуни Л63, предварительно пластически деформированной при одноосном растяжении (*a* – $\epsilon = 3\%$; *б* – $\epsilon = 6\%$; *в* – $\epsilon = 9\%$; *г* – $\epsilon = 11\%$) и прошедшей рекристаллизацию в зависимости от повторной пластической деформации.

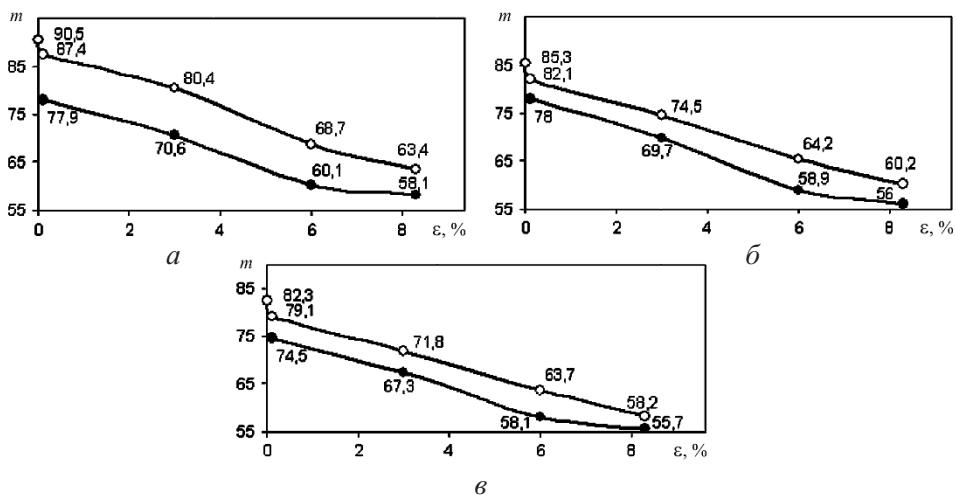


Рис. 7. Изменение коэффициента гомогенности *m* стали 45, предварительно пластически деформированной при одноосном растяжении (*a* – $\epsilon = 3\%$; *б* – $\epsilon = 6\%$; *в* – $\epsilon = 9\%$) и прошедшей рекристаллизацию в зависимости от повторной пластической деформации.

поставки после рекристаллизации увеличивается примерно в два раза, а поврежденность в оценке коэффициентом гомогенности *m* – в 1,5...1,6 раза.

Если исходный металл перед отжигом подвергнуть пластической деформации, то размер зерна, полученный в результате рекристаллизации, будет зависеть от уровня предварительной пластической деформации. Предварительная пластическая деформация исходного металла способствует увеличению размера зерна. Так, последующая после отжига пластическая деформа-

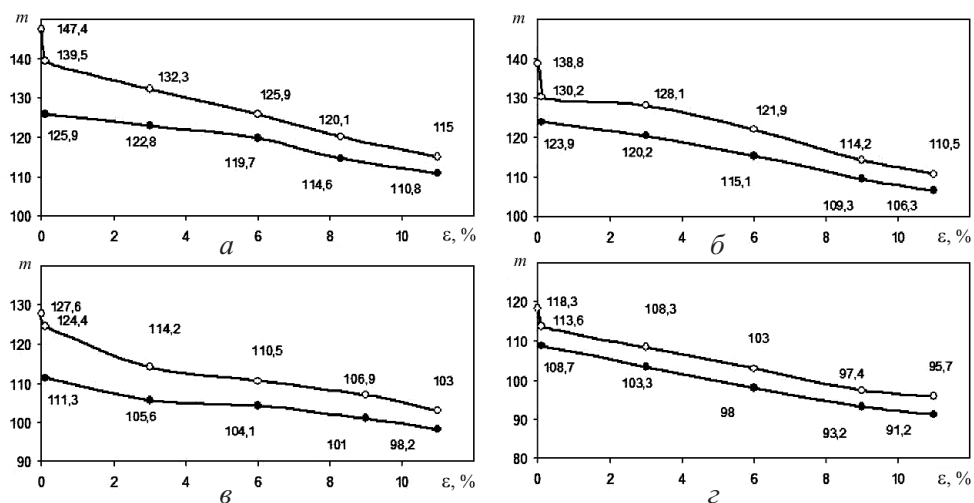


Рис. 8. Изменение коэффициента гомогенности m стали 09Г2С предварительно пластически деформированной при одноосном растяжении ($a - \epsilon = 3\%$; $б - \epsilon = 6\%$; $в - \epsilon = 9\%$; $г - \epsilon = 11\%$) и прошедшей рекристаллизацию в зависимости от повторной пластической деформации.

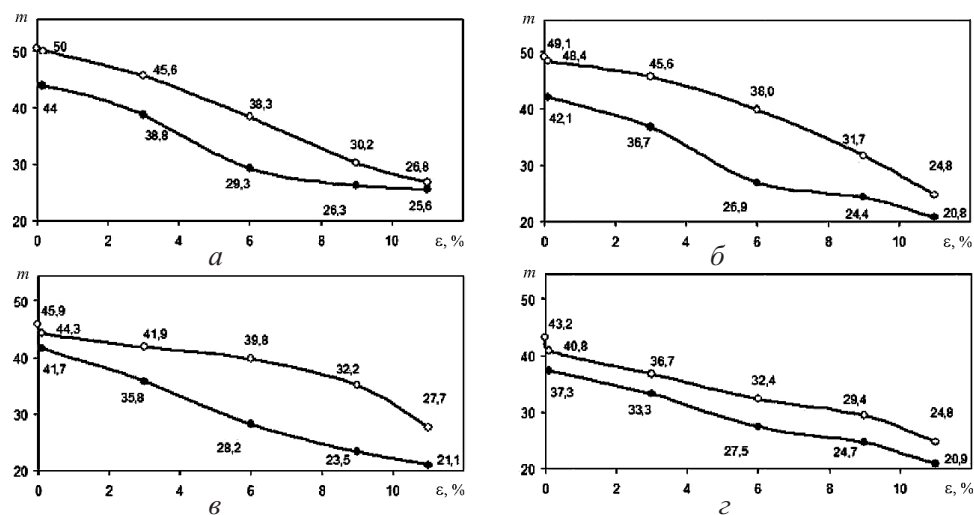


Рис. 9. Изменение коэффициента гомогенности m латуни Л63 предварительно пластически деформированной при одноосном растяжении ($a - \epsilon = 3\%$; $б - \epsilon = 6\%$; $в - \epsilon = 9\%$; $г - \epsilon = 11\%$) и прошедшей рекристаллизацию в зависимости от повторной пластической деформации.

ция предварительно деформированного металла до максимального уровня приводит к росту зерна для сталей 45 и 09Г2С примерно на 25...30%, для латуни Л63 на 50% по сравнению с таковым до повторного деформирования.

Однако общая тенденция к уменьшению размера зерна по мере увеличения деформации отожженных и предварительно деформированных металлов сохраняется и после повторного деформирования: размер зерна предварительно деформированных до приведенных выше уровней деформации и затем отожженных образцов из стали 45 при $\epsilon_i = 8,3\%$ составляет $d_{cp} = 17$ мкм, из стали 09Г2С и латуни Л63 при $\epsilon_i = 11\%$ – 17 и 37 мкм, после повторного

деформирования отожженных образцов из стали 45 до $\varepsilon_i = 8,3\% - 22$ мкм, из стали 09Г2С до $\varepsilon_i = 11\% - 20$ мкм и из латуни Л63 до $\varepsilon_i = 11\% - 58$ мкм. Результаты о трансформации размера зерна согласуются с данными, полученными при растяжении проволоки из стали 12Х18Н10Т после отжига в условиях различных температур [14].

Заметим, что диапазон “критических” для последующей термообработки деформаций приходится на участок упрочнения кривых деформирования исследуемых металлов после отжига. Здесь по мере повышения деформации с уменьшением размера зерна одновременно с увеличением твердости наблюдается рост поврежденности структуры металла, при этом в металле с большим размером зерна процессы накопления повреждений с увеличением пластической деформации протекают более интенсивно. Так, при $\varepsilon = 11\%$ поврежденность латуни Л63 увеличивается в два раза по сравнению с таковой после отжига, в то время как для стали 09Г2С это составляет всего 10%.

На рис. 10 представлены данные, свидетельствующие об изменении твердости и коэффициента гомогенности m после повторного деформирования, которые характеризуют темп роста твердости ΔH и повреждаемости Δm исследуемых металлов с увеличением деформации:

$$\Delta H = (H_1 - H_2)/H_1, \quad \Delta m = (m_2 - m_1)/m_1,$$

где H_1, m_1 – значение твердости и коэффициента гомогенности до отжига; H_2, m_2 – то же после отжига при тех же уровнях деформации.

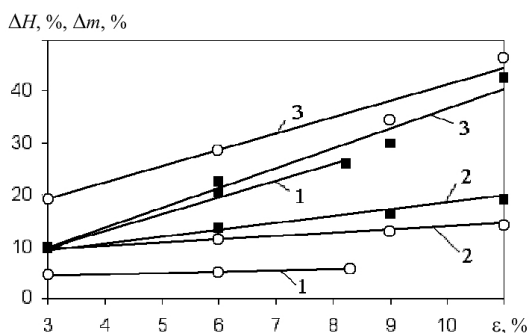


Рис. 10. Рост твердости (○) и коэффициента гомогенности (■) в зависимости от степени повторного деформирования после отжига: 1 – сталь 45; 2 – сталь 09Г2С; 3 – латунь Л63.

Видно, что процесс накопления повреждений в материале не зависит от характера изменения твердости. Темп роста повреждаемости сталей 45 и 09Г2С с невысокой пластичностью и размером зерна 17...22 мкм (в зависимости от деформации в диапазоне 3...11%) выше такового твердости при всех значениях деформаций, для более пластичной латуни Л63 со средним размером зерна 40...58 мкм рост твердости превалирует над увеличением поврежденности. Видно, что при одинаковых уровнях деформации процесс накопления повреждений в латуни Л63, имеющей больший размер зерна, происходит более активно, чем у сталей 45 и 09Г2С.

Установленная при анализе корреляция коэффициента гомогенности с поврежденностью металла может быть обусловлена тем, что для сталей

“белые области” рассмотренных структур представлены ферритом, который отвечает за пластические свойства материала и является наименее прочной фазой [4]. Как известно, в ней обычно наблюдается накопление повреждений, которые, в свою очередь, изменяют механические свойства материала. Поскольку физические свойства металлического образца в значительной мере определяются средним размером зерна, а наилучшим механическим свойствам почти всегда соответствует мелкозернистая структура, для латуни определяющее влияние на процесс накопления повреждений оказывает крупнозернистое строение структуры.

Отметим, что предварительная пластическая деформация до отжига существенно облегчает последующее деформирование металла, вследствие чего разрушение образцов, которые до отжига были пластически деформированы до больших уровней, происходило при наименьших напряжениях.

Выводы

1. На основании данных о рассеянии характеристик твердости, определенных при больших объемах испытаний, установлена степень влияния предварительной пластической деформации металла на его повреждаемость при последующем деформировании после рекристаллизации.

2. Показано, что в металле, прошедшем рекристаллизацию, с увеличением пластической деформации одновременно с ростом твердости происходит преобразование структуры металла за счет монотонного накопления повреждений. Размер зерна уменьшается, причем в металле с большим его размером процесс накопления повреждений происходит более активно.

3. Показана корреляционная связь параметра однородности m материала, подвергнутого рекристаллизационному отжигу, с размером зерна. Это свидетельствует об эффективности метода ЛМ-твердости при оценке поврежденности металлов, прошедших термосиловую обработку.

4. Предварительная пластическая деформация до отжига существенно облегчает последующее деформирование металла: чем больше уровень предварительной пластической деформации до отжига, тем при более низких значениях нагрузки происходит разрушение образцов металла после отжига.

Если пластически деформированный в одном направлении и прошедший рекристаллизацию металл вновь подвергнуть нагружению, то при развитой пластической деформации количество упругодеформируемых дефектов уменьшается. При этом по достижении предела прочности параметры поврежденности m металла в нагруженном и разгруженном состоянии становятся равными.

Резюме

Показано можливість використання методу ЛМ-твердості для оцінки стану металу в процесі термосилової обробки. Визначено степінь впливу початкової пластичної деформації металу на його пошкодженість у залежності від рівня деформації при подальшому деформуванні після рекристалізації за даними розсіяння масових значень характеристик твердості. Показано, що в попередньо деформованому металі, що пройшов рекристалізацію, зі збільшенням повторної пластичної деформації одночасно зі зменшенням розміру зерна і

ростом твердості має місце накопичення пошкоджень структури металу. Попередня пластична деформація до відпалу істотно впливає на процес накопичення пошкоджень у металі: чим вищий рівень попередньої пластичної деформації до відпалу, тим більш активно відбувається накопичення пошкоджень при деформуванні зразків металу після відпалу.

1. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.
2. Марковец М. П. Определение механических свойств материалов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 40 – 43.
3. Дрозд М. О. Определение механических свойств металла без разрушения. – М.: Металлургия, 1965. – С. 147 – 156.
4. Горбачев С. В., Щипачев А. М. Структурные изменения при деформационной термической обработке сварных соединений стали 20 // Мировое сообщество: проблемы и пути решения. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. – № 16. – С 102 – 105.
5. Пат. України № 52107А. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “Метод LM-твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Чинний з 15.01.03. Бюл. № 1.
6. Пат. України № 4406. Спосіб оцінки деградації матеріалу / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка. – Чинний з 17.01.05. Бюл. № 1.
7. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // J. Appl. Mech. – 1951. – 18, No. 3. – P. 293 – 297.
8. Лебедев А. А., Недосека С. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 2. – С. 3 – 8.
9. Лебедев А. А., Маковецький И. В., Музыка Н. Р. и др. Оценка поврежденности материала по рассеянию характеристик упругости и статической прочности // Пробл. прочности. – 2006. – № 2. – С. 5 – 14.
10. Лебедев А. А., Маковецький И. В., Музыка Н. Р., Швець В. П. Исследование процессов деформирования и накопления повреждений в стали 10ГН2МФА при малоцикловом нагружении // Там же. – 2008. – № 2. – С. 5 – 10.
11. Швець В. П., Музыка М. Р., Маковецький И. В., Булах П. О. Контроль поточного стану металу стрілкового переводу в процесі напрацювання // Там же. – 2011. – № 1. – С. 104 – 108.
12. Гуляев А. П. Металловедение. – М: Металлургия, 1966. – 478 с.
13. Музыка Н. Р., Маковецький И. В., Швець В. П. Оценка влияния напряженности материала на его повреждаемость при наработке // Пробл. прочности. – 2008. – № 4. – С. 102 – 107.
14. Унксов Е. П., Джонсон У., Колмогоров В. Л. и др. Теория пластических деформаций металлов / Под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 66 – 67.

Поступила 19. 09. 2011