

УДК 621.771.23.09

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ

Максимов А.Б., к.т.н., доцент (aleksandrms@yandex.ru)
Гуляев М.В., к. воен. н., доцент кафедры информатики и прикладной математики
Ерохина И.С., инженер, преподаватель

Керченский государственный морской технологический университет
(98300, Россия, Крым, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82)

Аннотация. Исследовано послынное развитие повреждаемости толстолистовой стали 10Г2С1 при холодной пластической деформации циклическим изгибом. Деформацию циклическим изгибом проводили по схеме чистого изгиба по симметричному циклу с амплитудой деформации 5,5 %. Характер изменения прочностных свойств стали свидетельствует о кинетике повреждаемости в процессе пластической деформации. Установлено, что в области обратимой повреждаемости интенсивность упрочнения возрастает, достигая наибольшего значения, а затем снижается. В области обратимой повреждаемости прочностные свойства стали не изменяются вплоть до разрушения. Предложен критерий верхней границы повреждаемости стали, равный $(0,2 - 0,3)N_p$, где N_p – число циклов до разрушения при циклическом растяжении–сжатии. В качестве структурного критерия обратимой повреждаемости выбран процесс трансформации ячеистой дислокационной структуры в полосовую.

Ключевые слова: толстолистовая сталь, циклический изгиб, амплитуда деформации, повреждаемость стали, дислокационная структура, обратимая и необратимая повреждаемость, циклическое растяжение–сжатие, количество циклов до разрушения.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-173-179

Исследованию развития кинетики повреждаемости при мало-и многоциклового усталости с позиции работоспособности стальной конструкции посвящено достаточное количество публикаций [1 – 5]. В данной работе циклическая деформация рассматривается как элемент термомеханической обработки и направлена на упрочнение стали. Для разработки оптимальных режимов упрочнения необходимо учитывать повреждаемость стали в процессе деформации [6]. Основными параметрами упрочняющей обработки толстолистового проката при пластическом циклическом изгибе являются амплитуда деформации и число циклов деформирования [7]. Холодная деформация циклическим изгибом горячекатаных и нормализованных толстолистовых сталей сопровождается упрочнением и развитием процессов повреждаемости. Общепринятым считается проведение деформационной обработки с целью упрочнения стали в области обратимой повреждаемости. Оценка степени повреждаемости стали при деформации может быть проведена по изменению дислокационной структуры, уровню остаточных напряжений в стали, а также методами, учитывающими многие факторы изменения структуры стали, например, коэрцитиметрии. Известно [8], что коэрцитивная сила является наиболее структурно-чувствительной характеристикой изменений, происходящих в стали при термическом и деформационном воздействиях по сравнению, например, с акустическим, электросопротивлением и др. В связи с тем, что при изгибе изменение структуры неравномер-

но по сечению, то метод коэрцитиметрии может только интегрально оценить повреждаемость.

Вследствие того, что при пластическом изгибе распределение деформации по сечению бруса неравномерно, выполненный послынный электронно-микроскопический анализ образцов, подвергнутых циклической деформации изгибом, показал [9], что кинетика изменения дислокационной структуры по всем слоям одинаковая. Вначале происходит увеличение плотности дислокаций и образуются дислокационные стенки, а затем, достигая определенного уровня плотности, формируется ячеистая структура. С увеличением степени пластической деформации ячеистая дислокационная структура переходит в полосовую. Дальнейшее развитие полосовой структуры приводит к образованию микротрещины. Чем дальше слой находится от средней геометрической линии бруса, тем при меньшем числе циклов изгиба начинаются эти процессы.

Аналогичное развитие дислокационной структуры в зависимости от числа циклов изгиба было установлено ранее в работе [5].

Исследования по развитию повреждаемости низколегированных сталей при пластическом циклическом изгибе с амплитудами деформации в несколько процентов в научной литературе освещены недостаточно.

Целью настоящей работы было изучение повреждаемости низколегированной стали по толщине широкого бруса при циклическом пластическом знакопеременном изгибе.

В качестве материала исследования использована толстолистовая низколегированная конструкционная сталь 10Г2С1. Из горячекатаных листов толщиной $8 \cdot 10^{-3}$ м вдоль направления прокатки вырезались заготовки размером $(25 \times 250) \cdot 10^{-3}$ м, которые подвергались нормализации от температуры 950 °С.

Полученные заготовки циклически деформировали чистым изгибом по жесткой схеме нагружения с амплитудой деформации ε_a , равной 5,5 % по поверхностному волокну. Поскольку ширина заготовки в 2,5 – 3,0 раза превосходила толщину, то это соответствовало напряженно-деформированному состоянию изгиба широкого бруса [10]. Расчет деформации по толщине бруса проводили по уравнению

$$\varepsilon_a = \frac{x_i}{R} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где ε_a – деформация i -го слоя бруса на расстоянии x_i от геометрически средней линии, м; R – радиус изгиба геометрически средней линии, м.

Ниже представлены данные по величине амплитуды деформации по сечению бруса, рассчитанной по уравнению (1):

$x_i \cdot 10^{-3}$, м	1	2	3	4
ε_i , %	1,4	2,8	4,3	5,7

Из заготовок вырезали образцы для испытания на растяжение по ГОСТ 1497–84 с определением условного предела текучести σ_T и временного сопротивления разрыву σ_B .

Твердость определяли по методу Виккерса с нагрузкой 100 Н (ГОСТ 2999–75). Измерение твердости проводили по толщине бруса через каждые $1 \cdot 10^{-3}$ м по обе стороны от геометрически средней линии.

Степень повреждаемости стали при деформировании рассчитывали по уравнению [5]

$$\Psi_i = \frac{N_i}{N_p}, \quad (2)$$

где Ψ_i – степень повреждаемости стали при числе циклов N_i ; N_p – число циклов деформирования до разрушения.

Поскольку при изгибе по толщине бруса деформация распределена неравномерно, то для уравнения (2) число циклов до разрушения N_p экспериментально находили при циклическом растяжении – сжатии специальных образцов на усовершенствованной установке ИМАШ-5С-65 [11]. Циклическое растяжение – сжатие проводили по симметричному циклу по жесткой схеме нагружения. Амплитуда деформации составляла 2 и 5 %.

В таблице представлены результаты расчета величины повреждаемости стали Ψ по уравнению (2) для различных слоев широкого бруса по толщине.

Распределение повреждаемости стали бруса в зависимости от числа циклов изгиба

Distribution of damage of steel timber according to the number of bending cycles

Число циклов изгиба	Повреждаемость при $x_i \cdot 10^{-3}$, м/ ε_i , %			
	1/1,4	2/2,8	3/4,3	4/5,7
1	0,030	0,077	0,125	0,200
2	0,060	0,155	0,250	0,400
4	0,120	0,311	0,500	–
8	0,240	0,622	1,000	–
15	0,450	1,000	–	–

На рис. 1 представлено изменение твердости в зависимости от числа циклов изгиба на расстояниях $(1, 2, 3, 4) \cdot 10^{-3}$ м от геометрически средней линии (показано изменение твердости по одну сторону от геометрически средней линии, по другую сторону – зависимость аналогичная).

Наблюдаются три стадии изменения твердости в каждом слое в зависимости от количества циклов изгиба. На первой стадии (для всех слоев до двух циклов изгиба) происходит увеличение твердости. Чем больше амплитуда деформации, тем выше интенсивность возрастания твердости и величина ее наибольшего увеличения.

После двух циклов деформирования происходит снижение твердости на 2 – 4 единицы. Для поверхностного слоя после двух циклов изгиба наступает стабилизация вплоть до разрушения ($N = 27$ циклов). Чем ближе слой расположен к геометрически средней линии, тем за большее число циклов происходит снижение

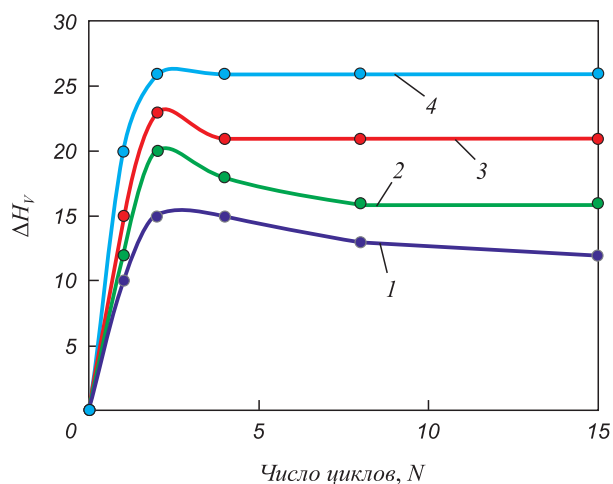


Рис. 1. Послойное изменение твердости по толщине бруса при циклическом изгибе. Цифры у кривых – расстояние от геометрически средней линии до слоя, мм

Fig. 1. Layer-by-layer hardness change along the timber thickness under cyclic bending. The numbers on the curves – the distance from the geometric center line to the layer, mm

твердости. Например, для слоя $x_3 = 3 \cdot 10^{-3}$ м ($\epsilon_3 = 4,3\%$) снижение заканчивается при $N = 4$ цикла, а для слоя $x_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м заканчивается при $N = 15$ циклов.

Третья стадия состоит в стабилизации уровня твердости, чем меньше амплитуда деформации, тем при большем числе циклов это происходит.

Повреждаемость оценивает структуру стали и поэтому имеет физический смысл. Наиболее распространенной характеристикой, оценивающей повреждаемость стали в условиях усталости, является отношение данного числа циклов к числу циклов до разрушения [5] (уравнение (2)). Эта характеристика применяется при много- и малоциклового усталости при деформации изгибом, растяжении – сжатии и кручении. Число циклов деформирования до разрушения при определенной амплитуде деформации определяет работу внешних сил. Энергия, подводимая к термодинамической системе, т. е. к образцу, по первому началу термодинамики затрачивается на его нагрев и изменение внутренней энергии [12]. По четвертой теории прочности (энергетической) [10] разрушение наступает при достижении определенного уровня удельной энергии изменения формы при растяжении.

На рис. 2 представлено изменение предела текучести стали 10Г2С1 в зависимости от степени повреждаемости при одноосном растяжении. Дифференцируя кривую зависимости предела текучести от степени повреждаемости для одноосного растяжения, получим величину, характеризующую интенсивность изменения предела текучести $\left(\frac{d\sigma_T}{d\psi}\right)$ (см. рис. 2, кривая 2). Вначале интенсивность изменения предела текучести увеличивается, достигая максимального значения при степени деформации порядка 3 % (степень повреждаемости составляет 0,21), а затем уменьшается (при растяжении до 10 %). При растяжении свыше 10 % начинается

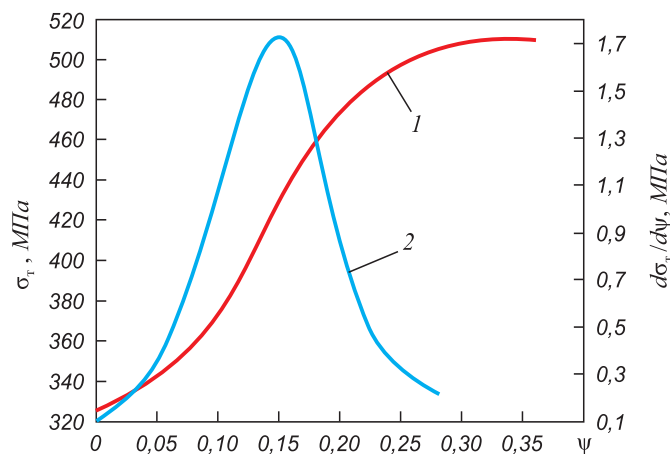


Рис. 2. Изменение предела текучести при растяжении (1) и скорости изменения предела текучести (2) в зависимости от повреждаемости

Fig. 2. Change of yield strength in tension (1) and rate of limit yield change (2), depending on the damage

локализация деформации с образованием шейки. При этом схема одноосного напряженного состояния переходит в трехосное. Поэтому сравнение с твердостью или прочностью, соответствующим большим степеням деформации, не корректно.

На рис. 3 представлено послойное изменение твердости в зависимости от степени повреждаемости стали, рассчитанной по уравнению (2). Представленные кривые имеют три стадии: повышение твердости с достижением максимального значения, дальнейшее разупрочнение, переходящее в стабилизацию. На стадии повышения явно выражено, что вначале интенсивность изменения твердости возрастает и при некоторой повреждаемости (в точке перегиба графика кривой) снижается, достигая при этом максимального значения твердости. С увеличением амплитуды деформации степень повреждаемости, соответствующая точке перегиба на графике изменения твердости, сдвигается в сторону большей повреждаемости. Максимальное упрочнение в каждом слое возрастает с увеличением амплитуды деформации и смещается в сторону большей повреждаемости. Видно, что с увеличением амплитуды деформации максимальное значение твердости наблюдается при большей степени повреждаемости стали, причем интенсивность изменения твердости также снижается.

Для сравнения приведена кривая зависимости твердости от степени повреждаемости для одноосного растяжения. Цифры около точек на графике – значение деформации растяжения в процентах. Максимальная твердость при циклическом изгибе на поверхности соответствует одноосному растяжению в интервале 3 – 4 %, но при этом степень повреждаемости больше: соответственно 0,35 – 0,4 и ~ 0,26.

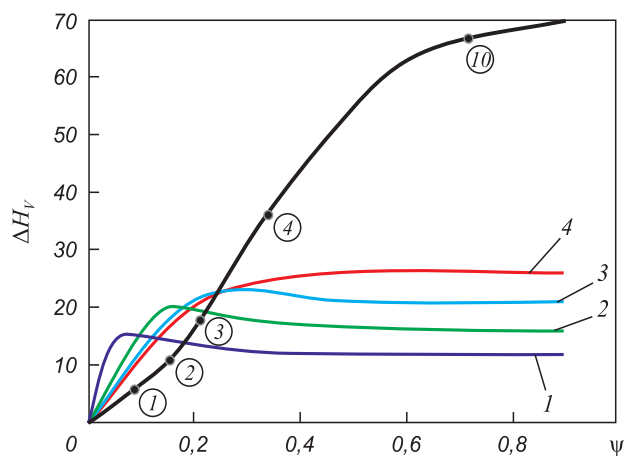


Рис. 3. Изменение твердости по толщине бруса при циклическом изгибе и растяжении (●) в зависимости от повреждаемости. Цифры у кривых – расстояние от центра бруса, мм. Цифры в кружках – степень деформации при растяжении, %

Fig. 3. Hardness change along the depth of the beams under cyclic bending and tension (●), depending on the damage. The numbers at the curves are the distance from the center of the beam in mm. The numbers in circles – the degree of deformation in % at tension

Сравнительный анализ изменения предела текучести при растяжении от величины повреждаемости стали качественно совпадает с изменением твердости при одноосном растяжении и послойном изменении твердости при циклическом изгибе бруса (см. рис. 2). Все сравниваемые кривые имеют точку перегиба, в которой интенсивность изменения предела текучести $\left(\frac{d\sigma_T}{d\psi}\right)$

или твердости $\left(\frac{dH_V}{d\psi}\right)$ от первоначального возрастания начинает снижаться. Отличие в том, что различная максимальная величина упрочнения каждого слоя соответствует своей степени повреждаемости. С увеличением амплитуды деформации точка перегиба смещается в сторону большей степени повреждаемости.

При циклическом изгибе каждый слой металла испытывает циклическую деформацию растяжения–сжатия. Для изотропного поликристаллического металла деформации растяжения и сжатия равнозначны, но их циклическая сменяемость приводит к проявлению эффекта Баушингера [13]. Поэтому, по-видимому, одинаковое упрочнение при одноосном растяжении, по сравнению с циклическим, достигается при меньшей степени повреждаемости, так как изменение направления деформации не приводит к «залечиванию» повреждаемости, но уменьшает эффективность блокирующего действия дислокационных скоплений. Таким образом, изменения прочностных характеристик как при одноосном растяжении, так и при циклическом изгибе показывают сходный характер кинетики повреждаемости стали.

Известно, что упрочнение стали при холодной пластической деформации на начальной стадии обусловлено увеличением плотности дислокаций. Зависимость упрочнения от плотности дислокаций выражается уравнением [5, 14]

$$\sigma_T = \sigma_0 + 0,5Gbp^{1/2}, \quad (3)$$

где σ_T – предел текучести стали, МПа; σ_0 – предел текучести стали до деформации, МПа; G – модуль сдвига, $7,8 \cdot 10^4$ МПа; b – вектор Бюргерса, $2,5 \cdot 10^{-10}$ м; ρ – плотность дислокаций, м^{-2} .

Зависимость (3) свидетельствует, что интенсивность изменения предела текучести $\frac{d\sigma_T}{d\rho}$ (производная предела текучести от плотности дислокаций) уменьшается.

Физический смысл повреждаемости стали при деформации состоит в образовании различных дефектов структуры, в основном дислокаций и вакансий. Увеличение скорости повышения прочностных свойств в зависимости от степени повреждаемости стали свидетельствует, что на первом этапе корреляционную связь между прочностными характеристиками, например пределом текучести и повреждаемостью, можно представить в виде полинома

$$\sigma_T = \sigma_0 + A\psi^n, \quad (4)$$

где A и n – постоянные для каждой марки стали, причем, $n > 1$.

После точки перегиба на графике $\sigma_T - \Psi$ (интенсивность увеличения предела текучести снижается) зависимость, вероятно, можно представить в виде

$$\sigma_T = \sigma_0 + B\psi^m, \quad (5)$$

где B и m – постоянные для марки стали, причем $m < 1$.

В работе [9] исследовалось изменение плотности дислокаций по сечению широкого бруса при циклическом изгибе стали 10Г2С1. Анализ данных этой работы подтверждает справедливость уравнений (4) и (5). В этой связи уравнение (3), скорее всего, описывает процесс на стадии разблокирования дислокаций при холодной пластической деформации (аналогично уравнению (5)).

Представленные изменения предела текучести и твердости показывают логическую связь между плотностью дислокаций и повреждаемостью стали. Естественно, что понятие повреждаемости более широкое, чем дислокационная структура, и количественно определяется намного проще, чем плотность дислокаций.

Поскольку повреждаемость стали развивается с самого начала приложения к конструкции внешних нагрузок и продолжается вплоть до разрушения, то определение допустимого (порогового) значения повреждаемости является важной задачей материаловедения.

Единого и универсального критерия для оценки повреждаемости стали в настоящее время не разработано.

Способы определения повреждаемости структуры стали по эволюции дислокационной структуры, развитию микронеоднородностей поверхности, изменению коэрцитивной силы стали и другие являются физически обоснованными. Поскольку при изгибе распределение деформации по сечению бруса неравномерное, то в данном случае наиболее приемлемым является оценивать повреждаемость по состоянию дислокационной структуры.

При циклической деформации одной из основных характеристик является число циклов до разрушения. На рис. 4 представлена кривая долговечности (кривая 1) при циклическом изгибе.

Известно [10], что для широкого бруса при чистом изгибе реализуется линейная схема напряженного состояния. Каждый элементарный слой металла, параллельный геометрически средней линии, испытывает только напряжения одноосного растяжения или сжатия.

Наиболее общепринятым критерием допустимой степени повреждаемости является область обратимой повреждаемости, определяемой по эволюции дислокационной структуры. Область обратимой повреж-

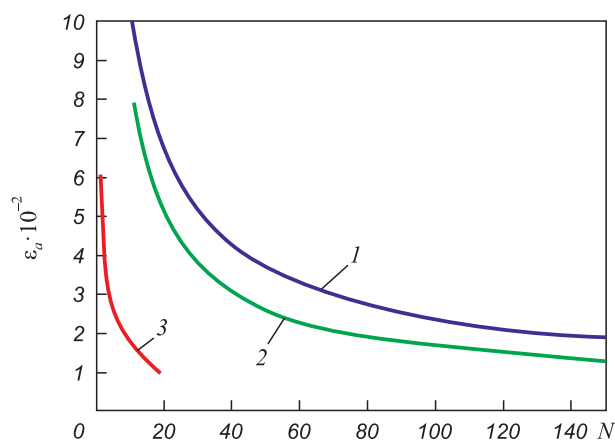


Рис. 4. Долговечность при циклическом изгибе (1), циклическое растяжение – сжатие (2) и линия Френча (3) для циклического растяжения – сжатия

Fig. 4. Curves of durability under cyclic bending (1), cyclic tension – compression (2) and the line of French (3) for cyclic tension – compression

даемости включает процессы увеличения плотности отдельных дислокаций и формирования ячеистой дислокационной структуры. Увеличение плотности дислокаций приводит к интенсивному упрочнению и снижению пластичности и вязкости стали. Формирование ячеистой дислокационной структуры приводит к снижению темпа упрочнения и некоторому улучшению пластичности и вязкости стали.

Дальнейшее деформационное воздействие приводит к трансформации ячеистой структуры в полосовую. Момент формирования полосовой структуры является началом образования микротрещины [10]. Микротрещины критического размера и более представляют необратимую повреждаемость. Поэтому были проведены

испытания на циклическое растяжение – сжатие с построением кривой долговечности (рис. 4, кривая 2).

В работе [15] установлено, что область обратимой повреждаемости составляет 0,2 – 0,3 от величины равномерного удлинения при растяжении. Как было указано выше, равномерная деформация при растяжении стали 10Г2С1 составляет приблизительно 12 %. Поскольку локализация деформации в шейке меняет схему напряженного состояния от линейной к трехосной, то логично принять значение завершения равномерной деформации соответствующей полной повреждаемости стали т. е. $\Psi = 1,0$. Тогда значение обратимой повреждаемости ограничивается величиной составляющей (0,2 – 0,3) Ψ . Свыше этого значения начинается область необратимой повреждаемости.

На основании результатов работы [11] была построена кривая предельно допустимых значений циклов деформирования в зависимости от амплитуды деформирования при циклическом растяжении – сжатии, определяющая начало развития полосовой дислокационной структуры (рис. 4, кривая 3).

Поскольку при пластическом изгибе распределение деформации по сечению бруса неравномерное, то при циклическом изгибе каждый слой подвергается различной степени повреждаемости. На рис. 5 представлено изменение повреждаемости по толщине бруса при различных циклах изгиба с нанесением границы между областями обратимой и необратимой повреждаемости. Видно, что обратимая повреждаемость при циклическом изгибе с амплитудой 5,5 % имеет два предельно-допустимых цикла. В этом случае, все сечения бруса находятся в области обратимой повреждаемости. При этом повышение предела текучести составляет 35 % [7].

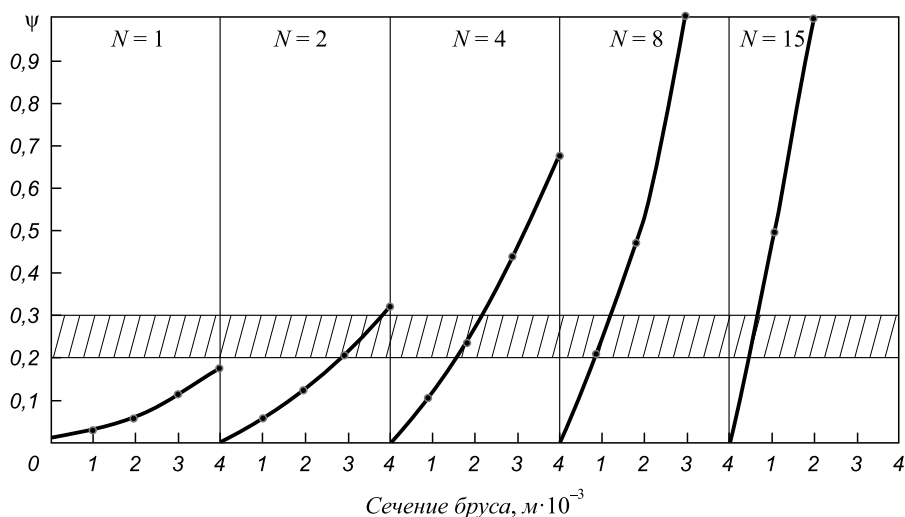


Рис. 5. Изменение повреждаемости по сечению бруса при циклическом изгибе в зависимости от числа циклов N . Заштрихованная полоса – верхняя граница обратимой повреждаемости

Fig. 5. Change of damage over the cross section of beam under cyclic bending depending on the number cycles N . The shaded band is the upper bound of reversible damage

Выводы. Полученные экспериментальные данные и их анализ позволили установить характер развития повреждаемости стали по сечению широкого бруса при циклическом изгибе. Чем ближе к поверхности бруса, тем больше упрочнение. Показано, что при деформационном упрочнении циклическим изгибом в холодном состоянии прочностные свойства в каждом слое бруса возрастают, достигая своего максимального значения. На стадии возрастания прочностных свойств вначале

интенсивность изменения предела текучести $\left(\frac{d\sigma_T}{d\psi}\right)$

или твердости $\left(\frac{dH_V}{d\psi}\right)$ увеличивается, а затем уменьшается.

Такой характер изменения интенсивности прочностных свойств объяснен развитием повреждаемости структуры стали. В качестве критерия предельно-допустимого состояния металла при деформационной упрочняющей обработке определен момент начала трансформации ячеистой дислокационной структуры в полосовую, т. е. когда обратимая повреждаемость переходит в необратимую. Предположено, что предельно-допустимая повреждаемость стали при деформационной обработке не должна превышать 0,2 – 0,3 от максимальной повреждаемости. Характер изменения прочностных свойств при циклической и односторонней деформации одинаковый. Различие состоит в увеличении упрочнения: при одностороннем растяжении максимальное упрочнение больше, чем при циклическом, и достигается при меньшей повреждаемости. Такое различие объясняется эффектом Баушингера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.

2. Ибатуллин И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. – Самара: Изд-во Самарского гос. техн. ун-та, 2008. – 387 с.

3. Дронов В.С., Селиверстов Г.В. Кинетика развития усталостной повреждаемости в малоуглеродистой стали // Изв. Тул. ГУ. Сер. Подъемно-транспортные машины и оборудование. 2006. Вып. 7. С. 207 – 212.

4. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.И. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

5. Иванова В.С., Терентье В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

6. Максимов А.Б. Оценка повреждаемости низколегированной стали при холодной пластической деформации // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2013. № 1. С. 29 – 31.

7. Подгайский М. С., Максимов А. Б. Влияние циклической деформации знакопеременным изгибом на механические свойства низколегированных сталей в зависимости от исходного структурного состояния. – В кн.: Термическая и термомеханическая обработка проката. – М.: Металлургия, 1981. С. 25 – 27.

8. Ануфриев С.В. Кондауров Е.Ю., Пузочкина А.С., Гудовщиков В.А. Методология исследования кинетики усталостной повреждаемости низколегированных сталей при различных коэффициентах асимметрии // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. 2009. Вып. 2-1. С. 193 – 198.

9. Подгайский М. С., Максимов А. Б., Нескуб Ю. П. Влияние деформации циклическим изгибом на дислокационную структуру стали 10Г2С1 // Изв. АН СССР. Металлы. 1984. № 4. С. 131 – 133.

10. Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов: Учебник для вузов. – М.: МГТУ, 2000. – 592 с.

11. Максимов А. Б. Исследование пластической деформации при циклическом растяжении – сжатии // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2010. № 1. С. 61 – 66.

12. Воронин Г.Ф. Основы термодинамики. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 192 с.

13. Физические основы металловедения. Т. 3. / Под ред. Р.У. Кана, П.Т. Хаазена. – М.: Металлургия, 1987. – 663 с.

14. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 406 с.

15. Ровинский Б.М., Рыбакова Л.М. Обратимость пластической деформации при повторном растяжении и сжатии // Физика металлов и металловедение. 1970. Т. 29. Вып. 5. С. 1081 – 1087.

Поступила 15 февраля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 3, pp. 173–179.

THE STUDY OF DAMAGEABILITY OF PLATE STEEL UNDER CYCLIC PLASTIC BENDING

A.B. Maksimov, V.M. Gulyaev, I.S. Erokhina

Kerch State Marine Technical University, Kerch, Russia

Abstract. The authors have investigated the layer-by-layer development of damage of 10G2S1 plate steel during cold plastic deformation by cyclic bending. Deformation cyclic bending was performed according to the scheme of pure bending at symmetric cycle with amplitude of deformation of 5.5 %. The character of changes of the strength properties of steel shows the kinetics of damage in the process of plastic deformation. It was established that in the area of reversible damage the intensity of hardening increases, reaching a maximum value and then decreases. In the area of reversible damage the mechanical properties of steel doesn't change until destruction. Criterion upper bound of damage is at $(0,2 - 0,3)N_p$, where N_p is the number of cycles to failure under cyclic tension – compression. The transformation process of the cellular dislocation structure in the passband is selected as a structural criterion of reversible damage.

Keywords: plate steel, cyclic bending, amplitude of deformation, damaging of steel, dislocation structure, reversible and irreversible damaging, cyclic tension – compression, number of cycles to fracture.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-173-179

REFERENCES

1. Vladimirov V.I. *Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov* [Physical nature of metals fracture]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 280 p. (In Russ.).

2. Ibatullin I.D. *Kinetika ustalostnoi povrezhdaemosti i razrusheniya poverkhnostnykh sloev* [Kinetics of fatigue deformation and fracture of surface layers]. Samara: Izd-vo Samarskogo gos. tekhn. Un-ta, 2008, 387 p. (In Russ.).

3. Dronov V.S., Seliverstov G.V. Kinetics of development of fatigue deformation in low-carbon steels. *Izvestiya Tul. GU. Ser. Pod'emno-*

- transportnye mashiny i oborudovanie*. Tula: Izd-vo Tul'sk. Gos. Un-ta, 2006, Issue 7, pp. 207–212. (In Russ.).
4. Regel' V.R., Slutsker A.I., Tomashevskii E.I. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [Kinetic nature of solids strength]. Moscow: Nauka . 1974, 560 p. (In Russ.).
 5. Ivanova V.S., Terent'ev V.F. *Priroda ustalosti metallov* [Nature of metals fatigue]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 456 p. (In Russ.).
 6. Maksimov A. B. Estimation of damage of low-alloyed steel during cold plastic deformation. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*. 2013, no. 1, pp. 29–31. (In Russ.).
 7. Podgaiskii M.S., Maksimov A.B. The Influence of cyclic alternating bending deformation on the mechanical properties of low alloyed steels depending on the initial structural state. In: *Termicheskaya i termomekhanicheskaya obrabotka prokata* [Thermal and thermo-mechanical treatment of rolled products]. Moscow: Metallurgiya, 1981, pp. 25–27. (In Russ.).
 8. Anufriev S.V., Kondaurov E.Yu., Puzochkina A.S., Gudovshchikov V.A. Methodology of the study of kinetics of fatigue damage of low-alloyed steels with different coefficients of asymetrie. *Izvestiya Tul'skogo gos.un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2009, vol. 2–1, pp. 193–198. (In Russ.).
 9. Podgaiskii M. S., Maksimov A. B., Neskub Yu. P. Effect of cyclic deformation on the dislocation bending structure of 10G2S1steel. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1984, no. 4, pp. 131–133. (In Russ.).
 10. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov: Uchebnik dlya vuzov* [Strength of materials: Textbook for universities]. Moscow: MG TU. 2000, 592 p. (In Russ.).
 11. Maksimov A.B. Study of plastic deformation under cyclic tension – compression. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*. 2010, no. 1, pp. 61–66. (In Russ.).
 12. Voronin G.F. *Osnovy termodinamiki* [Fundamentals of thermodynamics]. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1987, 192 p. (In Russ.).
 13. *Physical metallurgy*. R.W. Cahn, Peter Haasen eds. Amsterdam: North-Holland, 1983. (Russ.ed.: *Fizicheskie osnovy metallovedeniya*, vol. 3. Moscow: Metallurgiya, 1987, 663 p.).
 14. Honeycombe R.W.K. *The plastic deformation of metals*. Edward Arnold ltd., 2nd ed. 1984, 483 p. (Russ.ed.: Honeycombe R. *Plasticheskaya deformatsiya metallov*. Moscow: Mir, 1972. 408 p.).
 15. Rovinskii B.M., Rybakova L.M. Reversibility of plastic deformation upon repeated stretching and compression. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1970, vol. 29, Issue 5, pp. 1081–1087. (In Russ.).

Information about the authors:

A.B. Maksimov, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor*
(aleksandr.mks@yandex.ru)

V.M. Gulyaev, *Cand. Sci. (Military), Assist. Professor of the Chair of Informatics and Applied Mathematics*

I.S. Erokhina, *Engineer, Lecturer*

Received February 15, 2016