УДК 629.33:539.422

СТРУКТУРНАЯ ПОВРЕЖДЕННОСТЬ ПРУЖИННО-РЕССОРНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЗОНЕ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

^{1,2}Яковлева С.П., ¹Буслаева И.И., ²Махарова С.Н., ¹Левин А.И.¹ФГБУН «Якутский научный центр СО РАН», Якутск, e-mail: spyakovleva@yandex.ru;²ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН», Якутск, e-mail: spyakovleva@yandex.ru

Для решения задач обеспечения надежности элементов конструкций и деталей техники необходима оценка влияния условий эксплуатации на процессы накопления в материале структурных повреждений различной масштабности, приводящих к появлению макротрещин. Поскольку существует некоторое расхождение данных, получаемых при лабораторной имитации поврежденности и при реальных условиях эксплуатации, исследована структурная поврежденность пружинно-рессорной стали после работы в дорожно-климатических условиях криолитозоны. Выявлены два основных типа структурной поврежденности стали, различающихся по масштабному уровню: микроповрежденность, отражаемая параметром микротвердости, и мезоповреждения в виде пор различного диаметра (от нескольких до десятков микрометров). Проведено структурно-статистическое исследование значений микротвердости и оценены характеристики пористости трех групп образцов пружинно-рессорной стали, ранжированных по интенсивности действовавших на металл эксплуатационных нагрузок. Показано, что в зоне предразрушения наблюдается отклонение распределения значений микротвердости от закона Гаусса. Для рассмотренных условий эксплуатации установлена определяющая роль множественного присутствия мелких пор в снижении сопротивления усталостному разрушению по сравнению с наличием крупных пор. Результаты работы могут быть использованы при развитии методов получения и обработки информации по структурной поврежденности материалов и при прогнозировании ресурса деталей автотехники, работающей в зоне холодного климата.

Ключевые слова: пружинно-рессорная сталь, усталостное разрушение, структурная поврежденность, микротвердость, пористость

THE STRUCTURAL DAMAGE OF SPRING STEEL AFTER OPERATION IN THE COLD CLIMATE ZONE

^{1,2}Yakovleva S.P., ¹Buslaeva I.I., ²Makharova S.N., ¹Levin A.I.¹Yakut Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: spyakovleva@yandex.ru;²Larionov Institute of Physicotechnical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: spyakovleva@yandex.ru

To solve the problems of ensuring the reliability of machinery parts, it is necessary to evaluate the influence of operating conditions on the structural damage accumulation processes in the material that leading to the appearance of macrocracks. Since there is some discrepancy between the data obtained during laboratory imitation of the damage and under real operating conditions, the structural damage to spring steel after working in the cryolithozone road-climatic conditions has been investigated. Two main types of structural damage to steel are identified, differing in scale: microdamage, reflected by the microhardness parameter, and meso-damages in the form of pores of various diameters (from several to tens of micrometers). A statistical study of the microhardness values was performed and the porosity characteristics of three groups of spring steel samples that ranked in terms of the intensity of the operating loads acting on the metal were estimated. It is shown that deviation of the microhardness values distribution from the Gaussian law is observed in the prefracture zone. For the operating conditions considered, the defining role of the multiple presence of small pores in reducing the resistance to fatigue failure in comparison with the presence of large pores was established. The results can be used in the development of methods for obtaining and processing information on the structural damage of materials and for service life forecasting of vehicle parts operating in the cold climate area.

Keywords: spring steel, fatigue failure, structural damage, microhardness, porosity

Потеря несущей способности и разрушение элементов металлоконструкций и деталей техники обычно обусловлены образованием в материале при эксплуатации локальных повреждений структуры, накопление и слияние которых приводит к зарождению и развитию микро- и макротрещин. Практически все свойства металлов являются структурно-чувствительными, в частности структурные особенности и их изменения контролируют сопротивление разрушению. Поэтому изучение накопле-

ния структурной поврежденности и ее влияния на механические и эксплуатационные свойства различных металлов и сплавов было и остается актуальной задачей материаловедения и наук о прочности. При этом необходимо проводить исследования повреждаемости материала с учетом условий нагружения для установления связей между показателями изменчивости его характеристик и эксплуатационными факторами. Оценка влияния различных факторов (в том числе природно-климатических) на надеж-

ность и безопасность технических объектов, разработка различных методов неразрушающего контроля текущего состояния их материала имеют важное научно-прикладное значение [1–3].

Как известно, в большинстве случаев детали машин испытывают повторные и знакопеременные нагрузки, которые приводят к возникновению и развитию усталостной поврежденности. Применительно к автотехнике Севера и Арктики, во избежание перехода усталостных трещин к спонтанному распространению по механизму хрупкого разрушения, одним из основных требований к металлу является сохранение достаточного уровня хладостойкости в течение периода эксплуатации. Следует отметить, что для деталей автотранспорта, работающего в жестких природно-климатических условиях северных территорий, исследование процессов накопления усталостных повреждений (вплоть до критического уровня) и их влияния на сопротивление хрупкому разрушению практически отсутствуют.

К числу деталей, лимитирующих надежность грузовых автомобилей, являющихся основным средством перевозки грузов в сложных транспортных условиях Якутии, входят элементы подвески [4, 5], изготавливаемые из рессорно-пружинных сталей. Цель данной работы – анализ особенностей структурной поврежденности, сформировавшейся в зоне предразрушения пружинно-рессорной стали при воздействии нагрузок, характерных для дорожно-климатических условий Севера. В дальнейшем планируется провести оценку влияния вида и уровня выявленных повреждений материала на его сопротивление хрупкому разрушению.

Материалы и методы исследования

Известен факт расхождения результатов, получаемых при испытаниях образцов с имитацией поврежденности в лабораторных условиях, и свойств реальных элементов конструкций и деталей, находившихся в эксплуатации. В данной работе в качестве материала исследований использована пружинно-рессорная сталь после работы в дорожно-климатических условиях Якутии – металл разрушившегося стандартного коренного листа рессоры передней подвески грузового автомобиля КАМАЗ-44108, эксплуатировавшегося преимущественно в зимнее время. На момент разрушения рессоры пробег машины составил ≈ 100000 км, то есть поломка произошла на стадии, соответствующей нормальному износу рессор. Трещина распространилась возле переднего кронштейна поперек листа рессоры (размеры листа $1675 \times 75 \times 10$ мм) на расстоянии ≈ 170 мм от переднего конца, разделив лист на длинный и короткий фрагменты.

Из длинного фрагмента были изготовлены три группы продольных образцов с различным уровнем поврежденности (исходя из того, что места крепления рессор к мосту и к раме считаются наиболее на-

груженными). Образцы, обозначенные как гр. 1, выполнены из промежуточного между линией излома и центром рессоры участка, в котором действовали напряжения, более низкие по сравнению с напряжениями в местах крепления. Образцы из металла центра рессоры в зоне ее фиксации стремянками к мосту были обозначены как гр. 2, из металла зоны предразрушения (у излома вблизи переднего крепления рессоры) – как гр. 3.

В настоящее время нет универсальных методов, позволяющих достаточно объективно и надежно оценить структурную поврежденность металла. В работе для изучения поврежденности были использованы такие показатели [6], как микротвердость (для описания микроповрежденности) и пористость (для описания мезоповрежденности). Присутствие пор (рис. 1, а), как характерного элемента структуры исследуемой стали, было подтверждено анализом металла аналогичной рессоры, эксплуатировавшийся в подвеске другого автомобиля КАМАЗ, и рессоры, не бывшей в эксплуатации. Поскольку в рассматриваемом случае невозможно дифференцировать начальную и внесенную эксплуатационным нагружением поврежденность, то образцы гр. 1 были приняты за условно исходные.

С целью минимизации влияния наклепа от резки и шлифования на точность замеров микротвердости микрошлифы подвергали трехкратной переполровке с травлением. Микротвердость H_{100} измеряли на приборе «ПМТ-3» при нагрузке на индентор $0,98 H$ (100 гс). Объем выборки для каждой зоны рессоры – около 1000 отпечатков. Статистический анализ проведен в программной среде EXCEL. Также для образцов всех трех групп рассчитывали коэффициент накопления структурной микроповрежденности k_p в соответствии с методикой, описанной в [7, 8] и использующей массив значений H_{100} .

Количество и суммарную площадь пор определяли на трех полях зрения площадью $2,0 \times 1,4$ мм каждое, наблюдаемых с помощью металлографического микроскопа «Neophot-32». По размерам поры условно были подразделены на мелкие (диаметр до 20 мкм) и крупные (диаметр наиболее крупных ≤ 40 мкм). Соответственно, объемные доли каждой группы пор обозначены как V_m и V_k , а общая пористость как $V_{общ}$.

Результаты исследования и их обсуждение

Микроструктура рессорно-пружинной стали. Поскольку в рессорах и пружинах не допускается остаточная деформация, важнейшее свойство сталей этой группы – высокое сопротивление малым пластическим деформациям. Необходимые показатели достигаются легированием кремнием и марганцем, влияющими на предел упругости, а также деформационным наклепом и термообработкой с мартенситным превращением и последующим отпускком. Исследованная кремнистая рессорно-пружинная сталь марки 60С2 (ГОСТ 14959-79) имеет следующий состав: Fe – 1,68 Si – 0,74 Mn – 0,63 C – 0,14 Cr – 0,09 Ni – 0,11 Cu, мас. %. Микроструктура стали представлена на рис. 1, б, и состоит из бейнита, мартенсита, феррита, небольших количеств остаточного аустенита.

Рис. 1. Поры в металле рессоры (а) и его микроструктура (б)

Природа разрушения рессоры. При движении автомобиля в его подвесках возникают изменяющиеся в широком амплитудно-частотном диапазоне напряжения и зависящие прежде всего от микропрофиля дороги [9]. Листовые рессоры в основном испытывают циклическое нагружение изгибом, подвергаясь также растяжению, сжатию, кручению. Поэтому для рессор наиболее частым видом разрушения является усталостное; исследуемая рессора претерпела именно такое разрушение, что подтверждается характерными концентрическими линиями на ее изломе (рис. 2). Здесь необходимо отметить, что в силу высокой локальности процессов в вершинах усталостных трещин распространяющаяся трещина не могла оказать существенного влияния на уже сформированную поврежденность прилегающих объемов материала. Так, применительно к стали 60ГС2 результаты работы [10] показали, что влияние развивающейся усталостной трещины на структуру становится незаметным уже на расстоянии $\sim 2,5$ мм от поверхности излома. Этим подтверждается обоснованность определения образцов гр. 3 как образцов, соответствующих стадии предразрушения исследуемого материала.

Рис. 2. Участок усталостного излома рессоры

О механизмах эксплуатационных повреждений пружинно-рессорных сталей. Выявление механизмов формирования повреждений в конструкционных материалах является одной из основных задач изучения развития и наступления в них предельных состояний. В данной работе, как отмечалось выше, были исследованы микрповреждения, отражаемые параметром микротвердости, и мезоскопические повреждения в виде пор. Явления и процессы, связанные с изменением микротвердости и развития пор, составляют предмет отдельных фундаментальных исследований и рассматриваются на стыке наук о металлах и прочности. Тем не менее следует подчеркнуть неразрывность их природы, базирующейся на протекании микродеформаций. Особенность их развития в рессорных сталях связана с уже упоминавшимся свойством высокого сопротивления малым пластическим деформациям. Это свойство должно исключить при работе рессор возникновение в металле неупругих явлений. Вместе с тем, даже на стадии упругого деформирования под влиянием длительно действующих напряжений, не превышающих предела текучести, в структуре металлов всегда возникает некоторая микрповрежденность [1, 11, 12]. По мере эксплуатации в «упругой области» достижение определенного уровня развития микрповрежденности переводит металл в область пластического деформирования, что сопровождается обычными явлениями деформационного упрочнения и последующего разупрочнения. В зависимости от стадии развития поврежденности образцы металла должны различаться количествами деформационно-упрочненных и деформационно-разупрочненных кристаллитов, а также неслошностей в виде пор.

Коэффициент накопления поврежденности. Коэффициент k_p , предложенный в работах [7, 8], характеризует относитель-

ное увеличение плотности микроповрежденности материала при эксплуатации:

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^{m^*} a_i^* \cdot \frac{n_i^*}{N_i^*}}{\sum_{i=1}^m a_i \cdot \frac{n_i}{N_i}},$$

где n_i – число результатов, приходящихся на конкретный интервал микротвердости гистограммы для условно исходного состояния материала (в качестве которого был принят участок металла образцов гр. 1 с минимальной пористостью); N_i – полное число замеров при контроле микротвердости в условно исходном состоянии; n_i^* – число результатов, приходящихся на конкретный интервал микротвердости для трех групп образцов; N_i^* – полное число замеров при контроле микротвердости для трех групп образцов; i – номера интервалов микротвердости; m, m^* – число интервалов микротвердости, полученное на гистограммах, составленных для условно исходного состояния и для трех групп образцов; a_i, a_i^* – весовые коэффициенты, которые рассчитываются для каждого интервала микротвердости в пределах чисел интервалов m, m^* каждой гистограммы по формулам

$$a_i = 1 - (i-1) \frac{1,8}{m-1} \text{ для } i \leq \frac{m+1}{2};$$

$$a_i = 1 - (m-i) \frac{1,8}{m-1} \text{ для } i > \frac{m+1}{2}.$$

Характеристики поврежденности образцов. Вычисленные значения коэффициента k_p показаны в таблице. Там же приведены установленные характеристики пористости для всех трех групп образцов. Видно, что в образцах наблюдаются разные сочетания повреждений. Так, образцы гр. 1 из металла, в котором действовали более низкие напряжения по сравнению с напряжениями в двух других группах образцов, имеют промежуточные значения микротвердости и наименьшую объемную долю пор $V_{\text{общ}}^*$. Максимальные пористость и микротвердость выявляются в образцах гр. 2 (металл возле центрального крепления). Вблизи излома, то есть в образцах гр. 3, по объемной доле пористость мало отличается от пористости образцов гр. 1, микротвердость наиболее низкая.

Различия гистограмм, приведенных на рис. 3, указывают на разный уровень развития в образцах всех трех групп процессов упрочнения и разупрочнения металла. Для образцов гр. 1, несмотря на некоторую асимметрию гистограммы, не отвергается закон нормального распределения (при стандартном отклонении $s = 265$ МПа значения H_{100}

укладываются в интервал $\pm 3s$). Распределения H_{100} металла гр. 2 и гр. 3 имеют большую дисперсию и асимметрию, причем в первом случае наблюдается смещение в сторону повышения микротвердости (процессы упрочнения не достигли насыщения, металл находится на стадии упрочнения), а во втором – в сторону снижения, то есть металл уже разуплотнен микроповреждениями.

Качественное изменение структурного состояния образцов третьей группы подтверждается изменением конфигурации гистограммы: вид гистограммы рис. 3, в, позволяет предполагать невыполнение закона Гаусса для выборки значений микротвердости металла в зоне предразрушения. Проверка статистической гипотезы нормального распределения по критерию s^2 для эмпирического распределения дала значение $s^2 = 121$ при рассчитанном критическом значении $s_{\text{кр}}^2 = 16$, то есть $s^2 > s_{\text{кр}}^2$; следовательно, гипотеза нормального распределения для микротвердости образцов гр. 3 действительно отвергается. Справедливо предположить, что физическими причинами отклонения закона распределения микроповрежденности от нормального в зоне предразрушения являются существенные изменения структуры, связанные с реализацией механизмов адаптации материала к воздействию внешних нагрузок. Авторы работы [10] при изучении усталостных изменений структуры стали 60ГС2 наблюдали разрушение структуры исходного пакетного мартенсита, а также мартенситное превращение остаточного аустенита (образовавшийся мартенсит, будучи концентратором напряжений, может стать источником микротрещин). Помимо изменений субструктуры и структурно-фазовых превращений, искажение закона распределения повреждений, очевидно, обусловлено нарушениями неразрывности материала в виде микропор [13, 14] (Как уже отмечалось, подробное выявление механизмов формирования повреждений в материалах является самостоятельной задачей).

Если рассматривать образцы гр. 2 и гр. 3 из металла зон наибольшей нагруженности рессоры, то видно (таблица и рис. 3), что при меньших значениях коэффициента накопления поврежденности k_p и объемной доли общей пористости $V_{\text{общ}}^*$ разрушение произошло в зоне, характеризующейся:

- меньшим значением микротвердости (вследствие процессов разупрочнения);
- отклонением закона распределения микротвердости от нормального;
- значительным преобладанием количества мелких пор (на $\approx 47\%$);
- существенно меньшим количеством крупных пор (на $\approx 45\%$).

Коэффициент накопления микроповрежденности, средняя микротвердость
и характеристики пористости металла трех групп образцов

Параметр	Номер группы образцов		
	гр. 1	гр. 2	гр. 3
k_p	1,89	2,07	1,95
H_{100} , МПа	3720	3796	3590
$V_{\text{общ}} = V_m + V_k$ / количество	1,8 / 1081	2,2 / 1021	1,9 / 1348
V_m , % / количество	0,9 / 980	0,8 / 857	1,2 / 1258
V_k , % / количество	0,9 / 101	1,4 / 164	0,7 / 90

а

б

в

Рис. 3. Распределение микротвердости: а – образцы гр. 1; б – образцы гр. 2; в – образцы гр. 3

Отсюда следует, что множественные мелкие поры так же, как и субструктурное разупрочнение, вносят вклад в накопление рассеянной усталостной поврежденности и системное разрыхление исследуемой рессорно-пружинной стали, проявляющееся в изменении характера распределения пара-

метра микротвердости, на который влияют как особенности структуры, так наличие микронесплошностей.

Безусловно, что усталостная прочность определяется влиянием ряда факторов (частота нагружения, концентрация напряжений, асимметрия цикла, температура и т.д.);

тем не менее реализующиеся усталостные изменения структуры материалов по сути являются результатом интегрального воздействия этих факторов. Так, в рассматриваемом случае особенности возникших в массовой рессорно-пружинной стали 60С2 структурных дефектов объективно обусловлены в первую очередь влиянием дорожно-климатических факторов криолитозоны. Полученные данные по изменению микротвердости и ее распределения свидетельствуют о снижении возможности реализации пластических свойств материала в его локальных объемах, что должно приводить к потере общего запаса пластичности. В силу высокой вероятности внезапного хрупкого разрушения усталостно-поврежденного металла в этих условиях при случайном воздействии высоких динамических нагрузок, полученные результаты являются необходимой основой для последующего анализа влияния характера и уровня выявленной усталостной поврежденности на хрупкую прочность. Кроме того, представляет интерес изучение влияния особенностей пористой структуры на зарождение и развитие трещин. Поэтому далее планируется исследовать роль выявленных эксплуатационных микро- и мезоповреждений в сопротивлении стали 60С2 зарождению и развитию хрупкого разрушения при низких климатических температурах.

Выводы

1. Выявлено, что наступлению локальных предельных состояний и усталостному эксплуатационному разрушению массовой рессорно-пружинной стали 60С2 в условиях воздействия дорожно-климатических условий Севера предшествовало формирование системы объемных рассеянных повреждений структуры различного масштабного уровня – от микropовреждений на уровне субструктуры до мезоповреждений в виде мелких и крупных пор размером от нескольких до ~40 микрон.

2. Результаты структурно-статистического анализа микротвердости и оценка пористости образцов исследованной пружинно-рессорной стали, подвергавшихся с разной интенсивностью действию дорожно-климатических нагрузок, показали, что зона предразрушения при промежуточных значениях коэффициента накопления микropоврежденности и объемной доли общей пористости характеризуется:

- меньшим значением микротвердости (вследствие процессов разупрочнения);
- отклонением закона распределения микротвердости от нормального;
- значительным преобладанием количества мелких пор;

– существенно меньшим количеством крупных пор.

3. При рассмотренных условиях эксплуатации сочетание субструктурных повреждений с множественными мелкими порами явилось критическим видом дефектности с более неблагоприятным влиянием на сопротивление исследуемого материала развитию усталостного разрушения по сравнению с фактором присутствия крупных пор.

Таким образом, для характеристики рассеянной поврежденности, накопленной в рессорно-пружинной стали при эксплуатации в условиях зоны холодного климата, наряду с применением параметра микротвердости необходим учет фактора пористости.

Результаты исследований могут быть использованы при развитии методов получения и обработки информации по структурной поврежденности материалов, при прогнозировании ресурса деталей автотехники, работающей в криолитозоне.

Список литературы

1. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука, 2008. – 334 с.
2. Матвиенко Ю.Г. Моделирование и критерии разрушения в современных проблемах прочности, живучести и безопасности машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 3. – С. 80–89.
3. Sangid M.D. The physics of fatigue crack initiation // Int. J. of Fatigue. – 2013. – V. 57. – P. 58–72.
4. Ишков А.М., Кузьминов М.А., Зудов Г.Ю. Теория и практика надежности техники в условиях Севера / Отв. ред. В.П. Ларионов. – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – 313 с.
5. Кузьмин В.Р., Ишков А.М. Прогнозирование хладостойкости конструкций и работоспособности техники на Севере. – М.: Машиностроение, 1986. – 304 с.
6. Волегов П.С., Грибов Д.С., Трусов П.В. Поврежденность и разрушение: обзор экспериментальных работ // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 11–24.
7. Зорин Е.Е. Разработка метода оперативной диагностики и прогнозирования остаточного ресурса, основанного на регистрации накопленной поврежденности металлом конструкции в процессе длительного нагружения // Изв. МГТУ «МАМИ». – 2013. – Т. 4, № 1(15). – С. 142–148.
8. Зорин Е.Е., Зорин Н.Е. Оперативная диагностика на базе процесса микровдавливания механических характеристик сварных конструкций в процессе длительной эксплуатации // Сварка и Диагностика. – 2009. – № 5. – С. 25–29.
9. Kim H.S., Yim H.J., Kim M. Computational durability of body structure in prototype vehicles // Int. J. of automotive technology. – 2002. – № 3 (4). – P. 129–136.
10. Сучкова Е.Ю., Ивахин М.П., Громова А.В. и др. Анализ поверхности усталостного разрушения закаленной стали 60ГС2 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2005. – № 1. – С. 68–69.
11. Одесский П.Д. О деградации свойств сталей для металлических конструкций // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – Т. 69, № 610. – С. 86–92.
12. Dodds R.H., Anderson T.L., Kirk M.T. A Framework to Correlate a/W Effects on Elastic-Plastic Fracture Toughness (Jc) // Int. J. of Fracture. – 1991. – Vol. 48. Is.1. – P. 1–22.
13. Панин В.Е., Елсукова Т.Ф., Попкова Ю.Ф. Роль кризисы кристаллической структуры в образовании микропор и развитии трещин при усталостном разрушении технического титана // Доклады АН. – 2013. – Т. 453, № 2. – С. 155–158.
14. Bhat S., Patibandla R. Metal Fatigue and Basic Theoretical Models: A Review. Alloy Steel – Properties and Use, Dr. E.V. Morales (Ed.). INTECH Open Access Publisher. – 2011. – P. 203–236.