

УДК 620.178.322.1

МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ СТАЛИ 09Г2С, УПРОЧНЕННОЙ МЕТОДОМ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Лукин Е.С., Иванов А.М.

*ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова»
Сибирского отделения РАН, Якутск, e-mail: lukin@iptpn.ysn.ru*

В настоящей статье рассматриваются вопросы малоциклового усталости низколегированной низкоуглеродистой конструкционной стали. С целью повышения характеристик прочности сталь 09Г2С упрочняется методом интенсивной пластической деформации (ИПД) по способу равноканального углового прессования (РКУП). Полученная таким образом ультрамелкозернистая структура стали приводит к повышению характеристик прочности в 1,5–2 раза. Целью работы является исследование малоциклового усталости стали, подвергнутой РКУП. Приведен сравнительный анализ выносливости стали 09Г2С, подвергнутой РКУП и в исходном состоянии. Показано, что уровень максимальных напряжений цикла для стали, упрочненной РКУП, существенно выше, чем для исходного материала. При том же уровне напряжений циклов материал, подвергнутый РКУП, показывает большую выносливость. При максимальных значениях напряжения усталости, близких к пределу прочности s_b , для обоих видов материала наблюдается преимущественно квазистатический характер разрушения. Со снижением максимального напряжения усталости до предела текучести s_T разрушение носит усталостный характер.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, равноканальное угловое прессование, интенсивная пластическая деформация, упрочнение стали, кривая выносливости, характеристики прочности стали

LOW-CYCLE FATIGUE OF 09G2S STEEL STRENGTHENED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION METHOD

Lukin E.S., Ivanov A.M.

V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Yakutsk, e-mail: lukin@iptpn.ysn.ru

The question of low-cycle fatigue of low-carbon low-alloying structural steel, are presented in this paper. The steel 09G2S subjected by the severe plastic deformation method and equal channel angular pressure for the increasing of mechanical characteristics. Thus obtained ultra-fine-grain structure in the steel increases the strength characteristics by 1,5–2 times. The goal of present work is research of low-cycle fatigue of steel subjected EQAP. Comparative analyses of endurance of 09G2S steel subjected by the EQAP and in the initial state is shown. It is shown that the maximum cycle strength for steel reinforced by ECAP significantly higher than for the initial material. If the maximum strength of fatigue close to the ultimate strength s_b , for both types of material is observed mainly quasi-static fracture behavior. With the decline of the maximum stress to the yield point s_T , the fatigue failure is fatigue character.

Keywords: low-cycle fatigue, equal channel angular pressure, severe plastic deformation, strengthening of steel, endurance curve, characteristics of steel strength

Задача повышения надежности и долговечности машин и конструкций напрямую связана с выбором конструкционных материалов. В настоящее время номенклатура конструкционных материалов достаточно широка, но повышение прочностных характеристик всегда представляет большой интерес для исследователей. Применительно к сталям в материаловедении предлагаются два основных подхода: это легирование материалов и различные виды термомеханической обработки. Повышение прочностных характеристик сталей в последние годы, решается применением методов интенсивной пластической деформации (ИПД) – в частности по способу равноканального углового прессования (РКУП). ИПД по способу РКУП разработан В.М. Сегалом в 80-х годах прошлого столетия и впоследствии был развит Р.З. Валиевым с коллегами

[1, 7, 12, 13]. Данный способ относится к термомеханическим методам обработки материалов и позволяет повысить прочностные характеристики сравнительно небольших объемных заготовок из конструкционных сталей – за счет измельчения их зеренной структуры.

РКУП осуществляется в специальной высокопрочной пресс-форме, имеющей внутри два канала равного диаметра – пересекающихся под определенным углом [1]. Обычно угол пересечения каналов составляет 90° или 120°. Металлическая заготовка продавливается через пресс-форму, где в зоне пересечения каналов происходит измельчение его зеренной структуры – в основном за счет сдвиговых деформаций. РКУП может осуществляться в несколько проходов, что позволяет получить более мелкозернистую структуру. Для различных типов металлов

РКУП позволяет получить структуры с размером зерен/субзерен в диапазоне от нескольких микрон до сотен нанометров.

Как показано в работах различных исследователей, РКУП позволяет существенно повысить прочность металлических материалов и их сплавов. В отдельных случаях предел текучести/предел прочности могут повышаться в 1,5–2,5 раза [2, 11]. Такой результат обусловлен главным образом формированием ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, которая в соответствии с соотношением Холла – Петча обеспечивает существенное упрочнение. Обработанные методом ИПД конструкционные материалы могут быть использованы в качестве ответственных элементов деталей машин и различных конструкций.

Упрочнение малоуглеродистых конструкционных сталей по способу РКУП позволяет достичь характеристик прочности – сопоставимых с высокопрочными сталями [6]. Однако это приводит к снижению пластичности стали и вязкости разрушения. Данная проблема решается путем применения постдеформационного отжига, позволяющего улучшить характеристики сопротивления хрупкому разрушению, при незначительном снижении прочности [3]. Таким образом, применение комбинированных термомеханических методов обработки стали позволяет достичь необходимых эксплуатационных характеристик.

Одной из важных характеристик конструкционного материала является его выносливость – способность металла противостоять усталости. Исследованию усталостной прочности различных металлов и сплавов, подвергнутых ИПД, посвящен ряд работ [5, 8, 10]. Следует отметить, что для легких металлов и их сплавов в большинстве случаев упрочнение методом ИПД приводит к повышению усталостной прочности. Вместе с тем нередко предел выносливости после РКУП не превышает или даже снижается в сравнении с материалом в исходном состоянии [10, 9]. По всей видимости, в материалах, подвергнутых ИПД, нет однозначной зависимости между повышением прочности и его выносливостью.

Целью исследования является оценка малоциклового усталости стали 09Г2С, упрочненной ИПД по способу РКУП. Малоцикловую усталость испытывают материалы, используемые для конструкций, претерпевающих сравнительно малое число нагружений, но в то же время относительно большие перегрузки [4]. Экспериментальные данные по выносливости материалов, упрочненных РКУП, представляют собой практическую ценность.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе исследуется низколегированная конструкционная сталь 09Г2С. Данная марка стали широко используется в качестве различных деталей и элементов сварных конструкций, в том числе в условиях низких температур. Химический состав стали: 0,1% С, 0,85% Si, 1,41% Mn, 0,17% Cr, 0,18% Ni, 0,35% Cu, остальное Fe. Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)». Сталь поставлена в виде прутков диаметром 20 мм. Из прутков были изготовлены цилиндрические заготовки диаметром 20 мм и длиной 100 мм. Характеристики прочности стали в исходном состоянии и после упрочнения РКУП, определенные по результатам испытаний на растяжение, приведены в таблице.

Характеристики прочности стали 09Г2С

Сталь	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %
09Г2С в исходном состоянии	395,3	520,7	26,8
09Г2С после РКУП	794,4	839,2	14,7

Стальные заготовки из стали 09Г2С были подвергнуты РКУП при температуре 673 К в два прохода по маршруту «С». Угол пересечения каналов в пресс-форме составляет 120°. Металлографические исследования показали, что в стали 09Г2С после РКУП формируется ультрамелкозернистая структура со средним размером зерна 3–6 мкм, что в 1,5–2 раза меньше, чем в исходном состоянии. После РКУП из заготовок были изготовлены гладкие цилиндрические образцы для усталостных испытаний, схематические изображения которых представлены на рис. 1. Как видно из таблицы, прочность стали после РКУП существенно возрастает. Вместе с тем наблюдается снижение характеристик пластичности. Однако относительное удлинение на стадии упругого деформирования (до предела текучести) у стали 09Г2С после РКУП в 2 раза выше, чем в исходном состоянии.

Испытания на малоцикловую усталость проведены на испытательной машине Instron-1195. Частота испытаний находилась в пределах от 0,4 до 0,6 Гц и зависела от максимального напряжения цикла. Нами был выбран отнулевой вид циклического растяжения при заданной величине нагрузки (мягкое нагружение). Максимальное напряжение цикла задается при помощи координатного самописца и поддерживается постоянным автоматически до полного разрушения образца. По результатам испытаний были построены кривые усталости (зависимости амплитуды напряжения от количества циклов до разрушения образца).

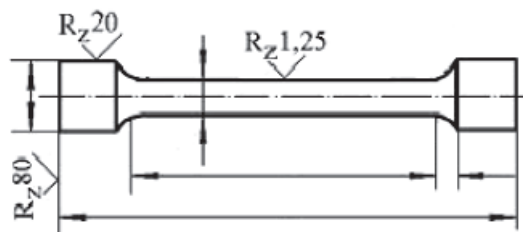


Рис. 1. Схематическое изображение гладкого цилиндрического образца для малоцикловых испытаний

Результаты исследования и их обсуждение

Была проведена серия испытаний на малоцикловую усталость для образцов из стали 09Г2С в исходном состоянии и после РКУП. На рис. 2 приведена кривая усталости для образцов из стали 09Г2С в исходном состоянии.

Малоцикловые испытания проводят для материалов, которые при эксплуатации конструкций испытывают редкие, но в то же время относительно большие перегрузки. Максимальное напряжение циклов выбирается в диапазоне от предела текучести и выше. Как видно из графика, со снижением величины напряжений количество циклов до разрушения возрастает.

На рис. 3 приведены кривые усталости для стали 09Г2С, упрочненной РКУП (пунктирная линия) и в исходном состоянии (сплошная линия). Как видно из графика, уровень максимальных напряжений цикла для стали упрочненной РКУП существен-

но выше, чем для исходного материала. При том же уровне напряжений циклов материал, подвергнутый РКУП, показывает большую выносливость при испытаниях на малоцикловую усталость. Данное обстоятельство связано с тем, что как и в большинстве случаев, с уменьшением размера зерна предел выносливости возрастает, в связи со значительным повышением прочности стали. При этом зависимость предела усталости от размера зерна может быть выражена формулой, аналогичной зависимости предела текучести от размера зерна. Анализ кривых малоцикловой усталости показывает, что тангенс угла наклона кривой усталости для УМЗ стали значительно больше по сравнению с исходной (рис. 3). Для стали 09Г2С, упрочненной РКУП в 2 прохода по маршруту «С» при температуре 673 К, коэффициент изменения долговечности $K_{ж}$ значительно больше, чем для стали в состоянии поставки.

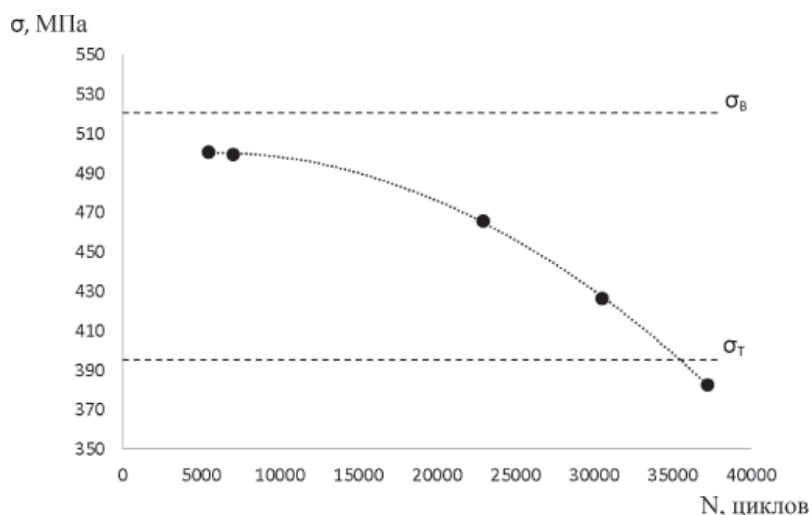


Рис. 2. Кривая малоцикловой усталости для образцов из стали 09Г2С в исходном состоянии

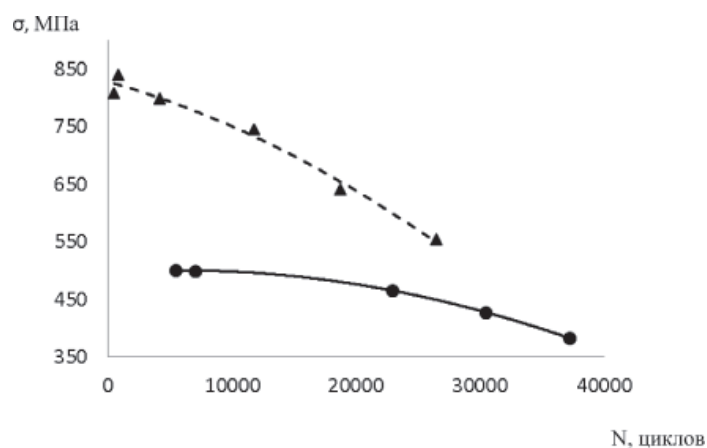


Рис. 3. Кривая малоцикловой усталости для образцов из стали 09Г2С, подвергнутых РКУП (пунктирная линия) и в исходном состоянии (сплошная линия)

Исследование изломов образцов показывает, что при максимальных значениях напряжения усталости, близких к пределу прочности σ_B , для обоих видов материала наблюдается преимущественно квазистатический характер разрушения. Со снижением максимального напряжения усталости до предела текучести σ_T разрушение носит преимущественно усталостный характер.

Заключение

Обработка низкоуглеродистой низколегированной стали методом ИПД по способу РКУП при температуре 673 К позволяет получить ультрамелкозернистую структуру со средним размером зерна 3–6 мкм, обеспечивающую более высокие характеристики прочности, чем в исходном состоянии. Максимальное напряжение усталости для стали после РКУП также возрастает, что является следствием роста характеристик статической прочности.

Более высокое значение коэффициента изменения долговечности $K_{ж}$ свидетельствует о более высокой скорости изменения долговечности для стали с УМЗ структурой при изменении напряжения, то есть предел выносливости может быть достигнут при меньшем числе циклов напряжений по сравнению со сталью с крупнозернистой структурой. Со снижением максимального напряжения циклов характер разрушения от квазистатического переходит к усталостному.

Работа выполнена в рамках научного проекта № III.28.1.1 по программе III.28.1 Сибирского отделения Российской академии наук.

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
2. Иванов А.М., Лукин Е.С. Закономерности деформирования металлических материалов со структурой, сформированной равноканальным угловым прессованием // Динамика сплошной среды. – Новосибирск: Институт гидродинамики СО РАН, 2007. – Вып. 125. – С. 43–46.
3. Лукин Е.С., Иванов А.М. Прочность и хладостойкость конструкционных сталей с субмикроструктурной структурой // Сборник трудов Евразийского симпозиума по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата: Пленарные доклады. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 352–356.
4. Методика усталостных испытаний: справочник / Л.М. Школьник. – М: Metallurgija, 1978. – 304 с.
5. Мурашкин М.Ю., Бобрук Е.В., Просвирнин Д.В., Овидько И.А., Терентьев В.Ф., Добаткин С.В., Валиев Р.З. Усталостная прочность алюминиевого сплава 6061 с ультрамелкозернистой структурой, сформированной интенсивной пластической деформацией кручением // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 4. – С. 17–24.
6. Петрова Н.Д., Лукин Е.С., Иванов А.М. Формирование ультрамелкозернистой структуры в малоуглеродистой стали методом равноканального углового прессования и термической обработки // Современное материаловедение и нанотехнологии: материалы между. науч.-техн. конф. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – Т.1. – С. 581–584.
7. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. – Минск: Наука и техника, 1994. – 231 с.
8. Семенова И.П. Прочность и повышенные усталостные свойства ультрамелкозернистых титановых прутков, полученных интенсивной пластической деформацией // Металлы. – 2010. – № 5. – С. 87–94.

9. Терентьев В.Ф., Добаткин С.В., Копылов В.И., Просвирнин Д.В., Бакунова Н.В. Особенности статического и циклического разрушения субмикроструктурного Al-Mg-Sc сплава // Материаловедение. – 2013. – № 2.

10. Терентьев В.Ф., Добаткин С.В., Просвирнин Д.В., Банных И.О., Копылов В.И., Серебряный В.Н. Усталостная прочность магниевых сплавов МА2-1 после равноканального углового прессования // Металлы. – 2010. – № 5. – С. 79–86.

11. Ivanov A.M., Lukin E.S., Petrova N.D., Vashenko S.S. Deformation and destruction of the structural steel subjected to severe plastic deformation and thermal processing // Reviews on advanced materials science. – Sep. 2010. – Vol. 25, Issue: 3. – P. 203–208.

12. Siegel R.W. / Proc. of the NATO ASI, Mechanical properties of ultrafine-grained materials. – Dordrecht-Boston-London: Kluwer Head. Publ., 1993. – Vol. 233. – 509 p.

13. Ultrafine-grained materials prepared by severe plastic deformation / Annales de Chimie. Science des Materiaux. Ed. R.Z. Valiev. – 1996. – Vol. 21. – 369 p.

References

1. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoj plasticheskoj deformaciej. M.: Logos, 2000. 272 p.
2. Ivanov A.M., Lukin E.S. Zakonomernosti deformirovaniya metallicheskih materialov so strukturoj, sformirovannoj ravnokanalnym uglovym pressovanijem // Dinamika sploshnoj sredy. Novosibirsk: Institut gidrodinamiki SO RAN, 2007. Vyp.125. pp. 43–46.
3. Lukin E.S., Ivanov A.M. Prochnost i hladostojkost konstrukcionnyh stalej s submikrokrystallicheskoj strukturoj // Sbornik trudov Evrazijskogo simpoziuma po problemam nadezhnosti materialov i mashin dlja regionov holodnogo klimata: Plenarnye doklady. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2014. pp. 352–356.
4. Metodika ustalostnyh ispytanj: spravocnik / L.M. Shkolnik. M: Metallurgija, 1978. 304 p.
5. Murashkin M.Ju., Bobruk E.V., Prosvirnin D.V., Ovidko I.A., Terentev V.F., Dobatkin S.V., Valiev R.Z. Ustalostnaja prochnost aljuminievogo splava 6061 s ultramelkozernistoj strukturoj, sformirovannoj intensivnoj plasticheskoj deformaciej kruchenijem // Deformacija i razrushenie materialov. 2015. no. 4. pp. 17–24.
6. Petrova N.D., Lukin E.S., Ivanov A.M. Formirovanie ultramelkozernistoj struktury v malouglerodistoj stali metodom ravnokanalnogo ugloвого pressovanija i termicheskoj obrabotki // Sovremennoe materialovedenie i nanotehnologii: materialy mezhd. nauch.-tehn. konf. Komsomolsk-na-Amure: GOUVPO «KnAGTU», 2010. T.1. pp. 581–584.
7. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I. i dr. Processy plasticheskogo strukturoobrazovanija metallov. Minsk: Nauka i tehnika, 1994. 231 p.
8. Semenova I.P. Prochnost i povyshennye ustalostnye svojstva ultramelkozernistyh titanovyh prutkov, poluchennyh intensivnoj plasticheskoj deformaciej // Metally. 2010. no. 5. pp. 87–94.
9. Terentev V.F., Dobatkin S.V., Kopylov V.I., Prosvirnin D.V., Bakunova N.V. Osobennosti staticheskogo i ciklicheskogo razrushenija submikrokrystallicheskogo Al-Mg-Sc splava // Materialovedenie. 2013. no. 2.
10. Terentev V.F., Dobatkin S.V., Prosvirnin D.V., Bannny I.O., Kopylov V.I., Serebrjanyj V.N. Ustalostnaja prochnost magnievogo splava MA2-1 posle ravnokanalnogo ugloвого pressovanija // Metally. 2010. no. 5. pp. 79–86.
11. Ivanov A.M., Lukin E.S., Petrova N.D., Vashenko S.S. Deformation and destruction of the structural steel subjected to severe plastic deformation and thermal processing // Reviews on advanced materials science. Sep. 2010. Vol. 25, Issue: 3. pp. 203–208.
12. Siegel R.W. / Proc. of the NATO ASI, Mechanical properties of ultrafine-grained materials. Dordrecht-Boston-London: Kluwer Head. Publ., 1993. Vol. 233. 509 p.
13. Ultrafine-grained materials prepared by severe plastic deformation / Annales de Chimie. Science des Materiaux. Ed. R.Z. Valiev. 1996. Vol. 21. 369 p.

Рецензенты:

Лепов В.В., д.т.н., заместитель директора по науке, ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова» СО РАН, г. Якутск;

Левин А.И., д.т.н., зав. сектором ритмологии северной техники, ФГБУН «Якутский научный центр» СО РАН, г. Якутск.