DOI 10.52209/1609-1825_2024_1_36 УДК 621.778

Исследование усталостных свойств и трибологические испытания стали AISI 316 после кручения под высоким давлением

[1]***ВОЛОКИТИНА Ирина Евгеньевна,** *PhD, доцент, irinka.vav@mail.ru,*
[1]**ЛЕЖНЕВ Сергей Николаевич,** *к.т.н., профессор, sergey_legnev@mail.ru,*
[2]**КУИС Дмитрий Валерьевич,** *к.т.н., профессор, dmitrykuis@mail.ru,*
[3]**ВОЛОКИТИН Андрей Валерьевич,** *PhD, доцент, dyusha.vav@mail.ru,*
[3]**ПАНИН Евгений Александрович,** *PhD, доцент, cooper802@mail.ru,*
[1]Рудненский индустриальный институт, ул. 50 лет Октября, 38, Рудный, Казахстан,
[2]Белорусский государственный технический университет, ул. Свердлова, 13а, Минск, Республика Беларусь,
[3]НАО «Карагандинский индустриальный университет», пр. Республики, 30, Темиртау, Казахстан,
**автор-корреспондент.*

Аннотация. *Исследовано влияние процесса кручения под высоким давлением в новом штампе на усталостные свойства коррозионностойкой стали AISI 316. Деформирование проводилось при криогенной и комнатной температурах. Количество циклов деформирования – 8. Исходная заготовка имела кольцевую форму диаметром 76 мм, шириной 3,5 мм и толщиной 3 мм. Выявлено, что усталостная прочность обоих образцов повышается за счет измельчения структуры и двойникования в аустените в ходе деформирования методом кручения под высоким давлением, частично мартенситного превращения и увеличения доли большеугловых границ в ходе циклической деформации. Основным фактором более высокого предела усталости стали AISI 316 после деформирования при криогенной температуре по сравнению с комнатной является более интенсивное измельчение микроструктуры и наличие повышенной доли большеугловых границ и протекание более полного мартенситного превращения.*

Ключевые слова: *усталостные свойства, кольца, сталь, интенсивная пластическая деформация, кручение под высоким давлением, трибология, деформация.*

Введение

На данный момент существует большое количество методов мегапластической деформации, основными из них являются: кручение под высоким давлением (КВД) [1] и равноканальное угловое прессование (РКУП) [2], но до сих пор они используются только в лабораторных масштабах. Для того чтобы расширить границы применения таких ультрамелкозернистых материалов при изготовлении элементов с индивидуальными физическими и механическими свойствами, необходимо придумать способ, который позволит производить полуфабрикаты с повышенными свойствами. К таким свойствам относятся: высокие прочностные характеристики, однородная равноосная ультрамелкозернистая структура как в продольном, так и поперечном сечениях и высокая доля большеугловых границ. Вдобавок новый способ обязан принимать во внимание заводские требования, несложно приспосабливаться к уже имеющемуся оборудованию и иметь недорогую и технологическую оснастку. Такой способ необходимо искать среди циклических методов обработки металлов давлением. Наиболее применяемыми и исследуемыми из этих способов, являются: винтовая экструзия, РКУП, КВД, которые позволяют при деформации сохранять исходную объемную форму обрабатываемой заготовки независимо от степени деформации, приложенной к ней [3-6].

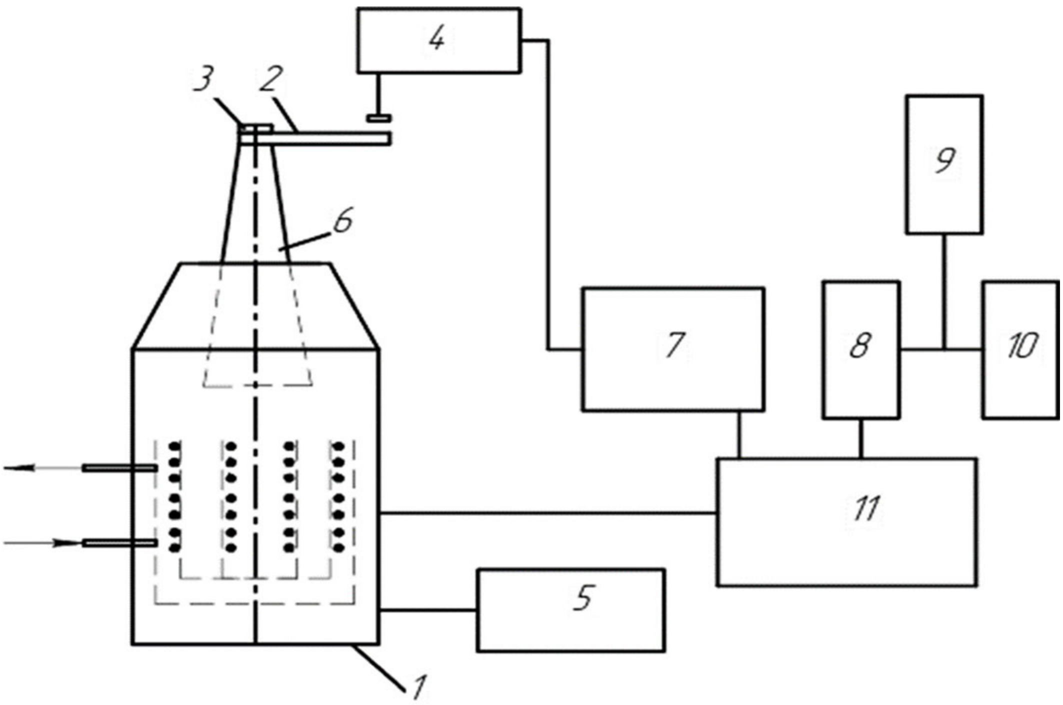
Одним из таких методов является КВД в штампе новой конструкции, позволяющей деформировать кольцевые заготовки на кривошипном горячештамповочном одностоечном прессе. Предыдущие работы [7-8] показали хорошие результаты влияния данного процесса на микроструктурные свойства и механические характеристики. Но не были исследованы характеристики усталостной прочности, которые являются важными критериями оценки стабильности структурного состояния металла и его работоспособности в условиях циклических нагрузок.

Поэтому целью данной работы является исследование усталостных свойств и трибологические испытания стали AISI 316 после кручения под высоким давлением при криогенной и комнатной температурах.

Материал и методика исследования

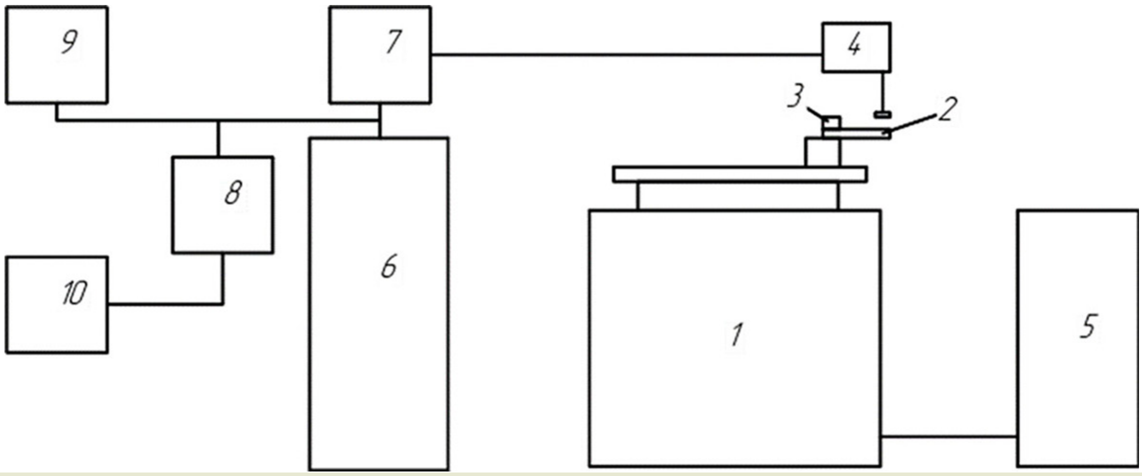
Исходная заготовка имела кольцевую форму диаметром 76 мм, шириной 3,5 мм и толщиной 3 мм. Для материала образцов выбрана сталь аустенитного класса AISI 316. Эксперимент проводился в лаборатории на одностоечном горячештамповочном кривошипном прессе модели ПБ 6330-02. Количество циклов деформирования – 8. Деформирование проводилось в среде жидкого азота (криогенная температура) и для сравнения при комнатной температуре. Для проведения усталостных испытаний использованы испытательные стенды, разработанные ранее в Белорусском государственном техническом университете (Минск, Беларусь). Для установления частотной зависимости усталостной долговечности материалов, а также характера изменений их физико-механических свойств при циклическом нагружении использованы испытательные комплексы с частотами изгибных и продольных колебаний 0,15; 3,9; 18 кГц (рисунки 1, 2) [9].

При испытании образцов на высоких частотах применялись магнитострикционные стенды. Такие стенды работают в автоколебательном режиме, как показано на рисунке 1. Магнитострикционные преобразователи являются активными элементами этих установок, они преобразуют электрические колебания в механические. Для стендов, работающих на резонансной частоте 18 кГц, использовались стандартные магнитострикционные преобразователи пакетного типа ПМС–15А–18, собранные из тонких пермендюровых пластин. Для стендов, работающих на частотах 3 и 9 кГц, были использованы специальные пакеты с вышеуказанными резонансными частотами и оригинальными активными элементами, набранными из никелевых (НП2) пластин. Пакеты соединялись пайкой с фланцем из стали 45, который в



1 – магнитострикторный преобразователь; 2 – образец; 3 – устройство крепления; 4 – виброметр МРТИ; 5 – модуль подмагничивания; 6 – концентратор-волновод; 7 – прибор стабилизации амплитуды (ПСА); 8 – частотомер; 9 – осциллограф; 10 – вывод на ПЭВМ; 11 – усилитель и генератор сигнала

Рисунок 1 – Принципиальная схема комплекса осуществляющего нагружение в широком диапазоне частот и температур



1 – вибратор ВЭ; 2 – образец; 3 – устройство крепления; 4 – виброметр МРТИ; 5 – модуль подмагничивания; 6 – усилитель SAVAGE; 7 – прибор стабилизации амплитуды (ПСА); 8 – частотомер; 9 – осциллограф; 10 – вывод на ПЭВМ
Рисунок 2 – Принципиальная схема низкочастотного испытательного стенда для кинематического возбуждения изгибных колебаний

свою очередь, посредством резьбового соединения, крепился с концентраторами. Для предотвращения самоотвинчивания резьбы и удобства частотного согласования концентратора с преобразователем применен специальный акустический резонатор, прижимаемый пружинами к свободному торцу активного элемента.

При усталостных испытаниях на низкой частоте использовалась установка для испытаний на базе электродинамического вибростенда типа В3 (рисунок 2). Величина циклических напряжений, действующих в опасном сечении образца, определялась с помощью наклеенного в данном сечении тензорезистора. Когда же он из–за усталостных повреждений выходил из строя, дальнейший контроль осуществлялся с помощью дополнительного тензодатчика, наклеенного в месте действия более низких напряжений.

Трибометр АТВП использовали для проведения трибологических испытаний. Данный трибометр оснащен устройством для регистрации коэффициента трения. Коэффициент трения измеряется в течение всего периода испытаний и на различных стадиях взаимно контактирующих тел. Измеренные значения претерпевают статистическую обработку, после чего определяются максимальные и средние значения.

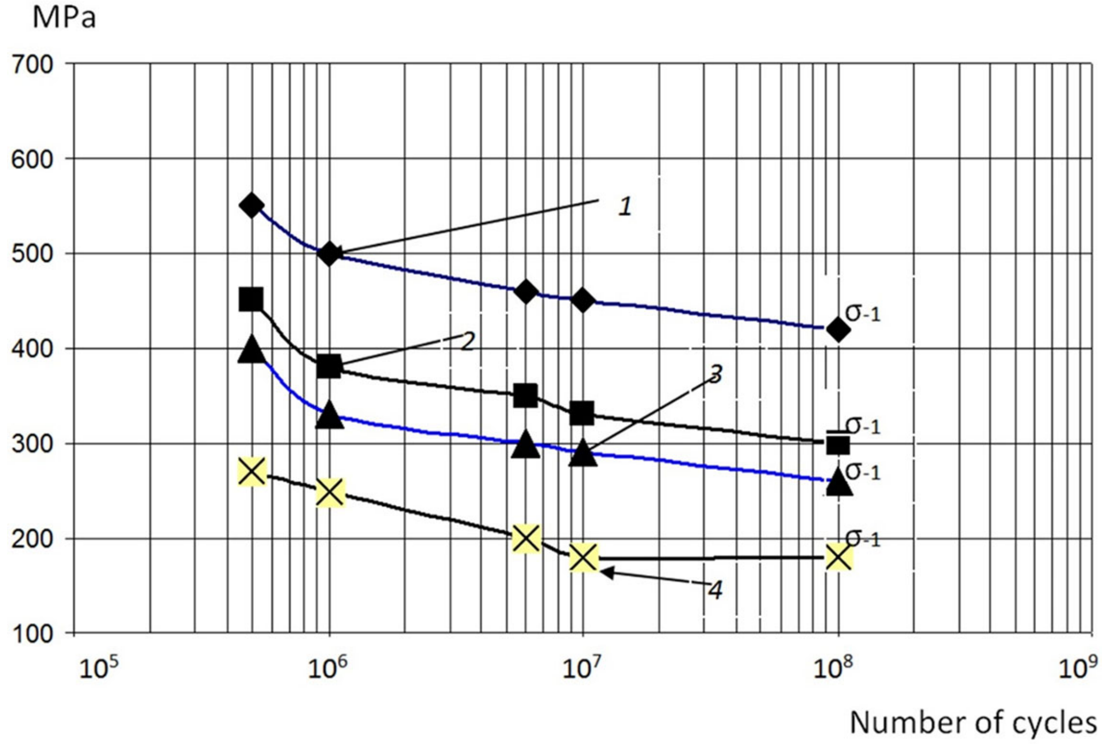
При измерении погрешность не превышала 5% от замеряемой величины. Для сравнения антифрикционных свойств проводились испытания образцов в режиме сухого трения. Образцы для испытаний имели форму прямоугольной призмы толщиной 2 мм и рабочей поверхностью 68 мм. Удельная нагрузка составляла 1,0 МПа.

Величина линейного износа измерялась с использованием метода искусственных баз. Данный метод основан на определении расстояния от дна искусственного углубления до поверхности трения. Углубления наносились на поверхность путем вдавливания алмазного индентора в виде пирамиды с помощью прибора для испытания на твердость по Виккерсу. Глубина отпечатка вычислялась по формуле $H=d/7$, где d – длина диагонали отпечатка.

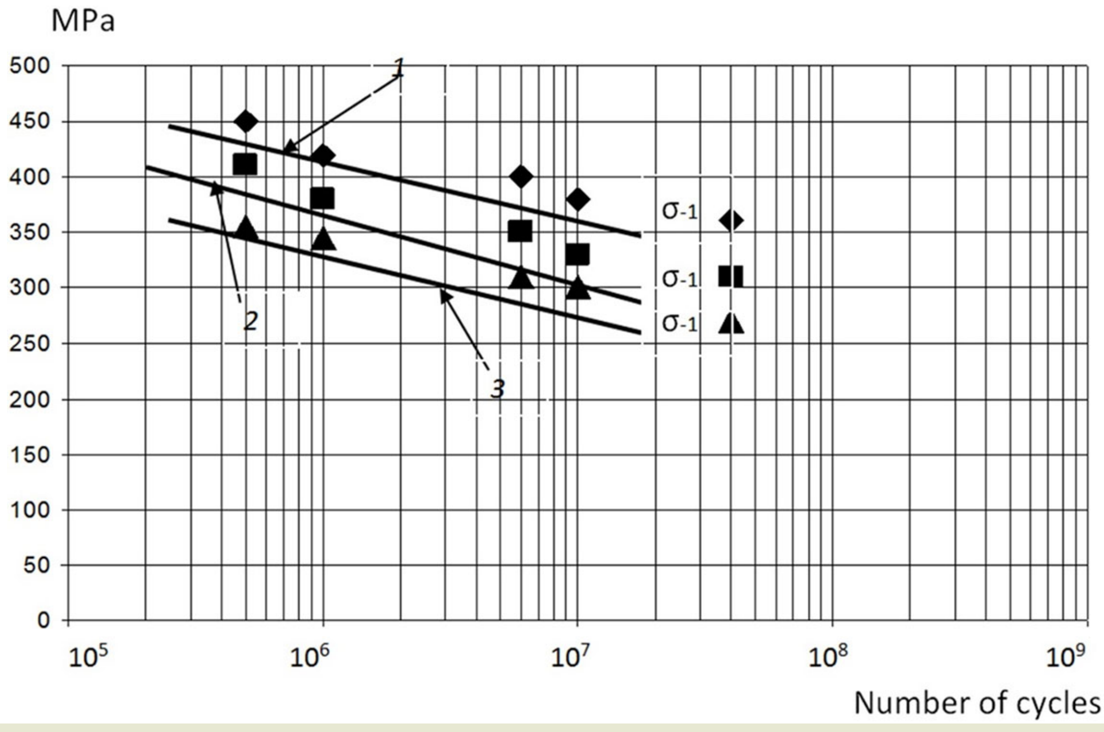
Результаты и их обсуждение

Усталостные испытания образцов из стали AISI 316 после деформирования методом КВД с использованием криогенного охлаждения и при деформировании при комнатной температуре проводились на оборудовании, описанном выше. Результаты усталостных испытаний при реализации знакопеременного изгиба на частоте 18 кГц представлены на рисунках 3–5.

Представленные исследования показали, что интенсивная пластическая деформация, проведенная методом КВД при криогенной температуре, привела к более существенному повышению усталостных характеристик стали AISI 316 (при различных температурах и условиях нагружения), чем при деформировании при комнатной температуре. При этом было установлено, что возрастание нагрузки до 346 МПа не изменяет характер усталостных кривых. Подоб-

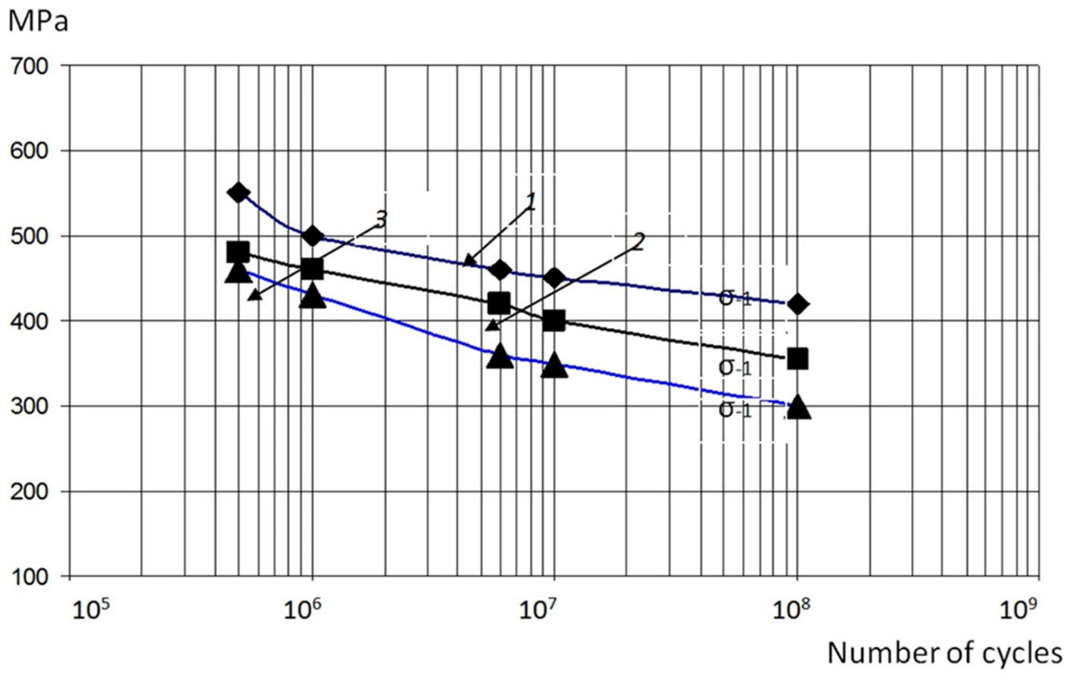


1, 3 – с обработкой КВД, 2, 4 – без проведения обработки
Рисунок 3 – Влияние обработки КВД на характеристики усталости стали AISI 316 при различных уровнях нагружения (1, 2 – уровень нагружения (254 МПа), 3, 4 – уровень нагружения (346 МПа))

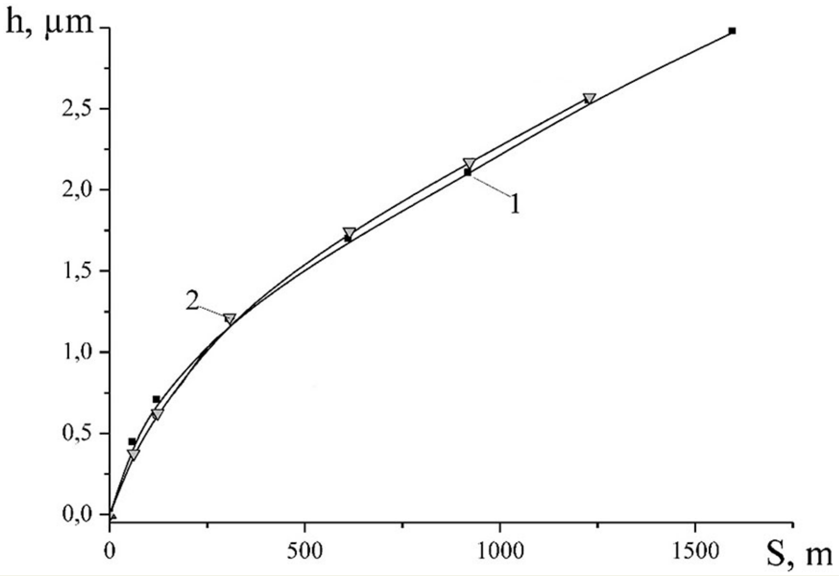


1 – 20°C, 2 – 200°C; 3 – 250°C
Рисунок 4 – Усталостные кривые стали AISI 316 после деформирования методом КВД при различных температурах испытаний

ное повышение усталостных характеристик объясняется в первую очередь получением мелкозернистой структуры в результате интенсивной пластической деформации методом КВД. Следует отметить, что подобные зависимости характерны и для повышенных температур испытаний (рисунки 4,5). На рисунке 6 приведены графические зависимости линейного износа от пути трения для образца, деформированного при криогенной



1 – 20°C, 2 – 200°C; 3 – 250°C
Рисунок 5 – Усталостные кривые стали AISI 316 после деформирования методом КВД при криогенной температуре при различных температурах испытаний



1 – образец, деформированный при криогенной температуре;
2 – образец, деформированный при комнатной температуре
Рисунок 6 – Зависимость линейного износа h от пути трения S (трение без смазочного материала, удельная нагрузка испытаний p=1 МПа, контртело – закаленная сталь У8)

температуре (кривая 1) и образца деформированного при комнатной температуре (кривая 2). Из представленных на рисунке 6 графиков можно видеть, что на начальных стадиях триботехнических испытаний (стадия приработки) линейный износ обоих образцов почти одинаков. При этом величина интенсивности изнашивания для образца, деформированного при криогенной температуре (образец 1), составляет $I_h=5,7\times10^{-9}$, а для образца 2 – $I_h=4,9\times10^{-9}$. При увеличении продолжительности испытаний интенсивность изнашивания образцов 1-2 становится практически одинаковой и составляет $I_h=1,32\text{-}1,38\times10^{-9}$.

Вывод

Результаты исследования показали, что несмотря на определенные количественные различия кинетики физико–механических характеристик рассматриваемого материала стали AISI 316 с обработкой при криогенной и комнатной температурах, процесс усталостного разрушения у них развивается по одним и тем же закономерностям.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08856353).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhilyaev A.P., Ringot G., Huang Yi., Cabrera J.M., Langdon T.G. Mechanical behavior and microstructure properties of titanium powder consolidated by high-pressure torsion // Mater. Sci. Eng. A. 2017. Vol. 688. Pp. 498-504.
2. Murashkin M.Yu., Sabirov I., Kazykhanov V.U. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC // J. Mater. Sci. 2013. 48. Pp. 4501-4509.
3. Kawasaki M., Ahn B., Lee H.J., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion to process an aluminum-magnesium nanocomposite through diffusion bonding // J. Mater. Res. 2015. Vol. 31. Pp. 88-99.
4. Maksimkin O.P., Gusev M.N., Tsai K.V., Yarovchuk A.V., Rybalchenko O.V., Enikeev N.A., Valiev R.Z., Dobatkin S.V. Effect of neutron irradiation on the microstructure and the mechanical and corrosion properties of the ultrafine-grained stainless Cr-Ni steel. Phys. Met. Met. 2015, 116, 1270-1278.
5. Verma D.P., Pandey S.A., Bansal A., Upadhyay Sh., Mukhopadhyay N.K., Sastry G.V.S., Manna, R. Bulk Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel Processed by Equal-Channel Angular Pressing Followed by Flash Annealing. J. Mater. Eng. Perform. 2016, 25, 5157-5166.
6. Eivania A.R., Mirzakoochakshirazib H.R., Jafariana H.R. Investigation of joint interface and cracking mechanism of thick cladding of copper on aluminum by equal channel angular pressing (ECAP) // Journal of Materials Research and Technology. 2020, Vol. 9 (3), pp. 3394-3405.
7. Volokitin A., Volokitina I., Panin E., Naizabekov A., Lezhnev S. Strain state and microstructure evolution of AISI-316 austenitic stainless steel during high-pressure torsion (HPT) process in the new stamp design // Metalurgija. 2021. 60 (3-4). Pp. 325-328.
8. Volokitin A., Naizabekov A., Volokitina I., Lezhnev S., Panin E. Thermomechanical treatment of steel using severe plastic deformation and cryogenic cooling. Mater.Lett. 2021, 304, 130598.
9. Капсаров А.Г., Бельский С.Е., Чигринова Н.М. Особенности расчета элементов испытательного оборудования для получения сложного напряженного состояния в широком диапазоне частот // Современные методы проектирования машин: Труды II Межд. конференции. – Мн., 2004. – Т. 4. – С. 242–245.

Жоғары қысымды бұралғаннан кейін AISI 316 болатының шаршау қасиеттерін зерттеу және трибологиялық сынақтар

[1]***ВОЛОКИТИНА Ирина Евгеньевна,** *PhD, доцент, irinka.vav@mail.ru,*
[1]***ЛЕЖНЕВ Сергей Николаевич,** *к.т.н., профессор, sergey_legnev@mail.ru,*
[2]***КУИС Дмитрий Валерьевич,** *к.т.н., профессор, dmitrykuis@mail.ru,*
[3]***ВОЛОКИТИН Андрей Валерьевич,** *PhD, доцент, dyusha.vav@mail.ru,*
[3]***ПАНИН Евгений Александрович,** *PhD, доцент, cooper802@mail.ru,*
[1]Рудный индустриалдық институты, Қазанға 50 жыл көшесі, 38, Рудный, Қазақстан,
[2]Беларусь мемлекеттік техникалық университеті, Свердлов көшесі, 13а, Минск, Беларусь Республикасы,
[3]«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Республика даңғылы, 30, Теміртау, Қазақстан,

**автор-корреспондент.*

Аннотация. *Жаңа қалыптағы жоғары қысымды бұралу процесінің AISI 316 коррозияға төзімді болаттың шаршау қасиеттеріне әсері зерттелді. Деформация криогендік және бөлме температурасында жүргізілді. Деформация циклдарының саны-8. Бастапқы дайындама диаметрі 76 мм, ені 3,5 мм және қалыңдығы 3 мм болатын дөңгелек пішінді болды. Екі үлгінің де шаршағыштық беріктігі жоғары қысымды бұралу әдісімен деформация кезінде аустенитте құрылымды ұнтақтау және қосарлану, ішінара мартенситтік конверсия және циклдік деформация кезінде үлкен бұрыштық шекаралардың үлесін арттыру арқылы жоғарылайтыны анықталды. Бөлме температурасымен салыстырғанда криогендік температурада деформациядан кейін AISI 316 жоғары шаршау шегінің негізгі факторы-микроқұрылымның қарқынды ұсақталуы және үлкен бұрыштық шекаралардың жоғарылауы және мартенситтік конверсияның толық ағымы.*

Кілт сөздер: *шаршау қасиеттері, сақиналар, болат, қарқынды пластикалық деформация, жоғары қысымды бұралу, трибология, деформация.*

Fatigue and Tribological Testing of AISI 316 Steel After High-pressure Torsion

[1]***VOLOKITINA Irina**, PhD, Associate Professor, irinka.vav@mail.ru,*
[1]***LEZHNEV Sergey,** Cand. of Tech. Sci., Professor, sergey_legnev@mail.ru,*
[2]***KUIS Dmitry,** Cand. of Tech. Sci., Professor, dmitrykuis@mail.ru,*
[3]***VOLOKITIN Andrey,** PhD, Associate Professor, dyusha.vav@mail.ru,*
[3]***PANIN Evgeny,** PhD, Associate Professor, cooper802@mail.ru,*
[1]Rudny Industrial Institute, 50 years of October Street, 38, Rudny, Kazakhstan,
[2]Belarusian State Technical University, Sverdlov Street, 13a, Minsk, Republic of Belarus,
[3]NPJSC «Karaganda Industrial University», Republic Avenue, 30, Temirtau, Kazakhstan,

**corresponding author.*

Abstract. *The effect of high-pressure torsion process in a new die on the fatigue properties of corrosion-resistant steel AISI 316 has been studied. The deformation was carried out at cryogenic and room temperatures. The number of deformation cycles was 8. The initial blank had a ring shape with a diameter of 76 mm, a width of 3.5 mm and a thickness of 3 mm. It is revealed that the fatigue strength of both samples increases due to structure refinement and twinning in austenite during high pressure torsion deformation, partial martensitic transformation and increase of the share of more angular boundaries during cyclic deformation. The main factor of higher fatigue limit of AISI 316 steel after cryogenic deformation in comparison with room temperature is more intensive grinding of microstructure and presence of increased share of large-angle boundaries and more complete martensitic transformation.*

Keywords: *fatigue properties, rings, steel, severe plastic deformation, high pressure torsion, tribology, deformation.*

REFERENCES

1. Zhilyaev A.P., Ringot G., Huang Yi., Cabrera J.M., Langdon T.G. Mechanical behavior and microstructure properties of titanium powder consolidated by high-pressure torsion // Mater. Sci. Eng. A. 2017. Vol. 688. Pp. 498-504.
2. MurashkinM.Yu., Sabirov I., Kazykhanov V.U. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC // J. Mater. Sci. 2013. 48. Pp. 4501-4509.
3. Kawasaki M., Ahn B., Lee H.J., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion to process an aluminum-magnesium nanocomposite through diffusion bonding // J. Mater. Res. 2015. Vol. 31. Pp. 88-99.
4. Maksimkin O.P., Gusev M.N., Tsai K.V., Yarovchuk A.V., Rybalchenko O.V., Enikeev N.A., Valiev R.Z., Dobatkin S.V. Effect of neutron irradiation on the microstructure and the mechanical and corrosion properties of the ultrafine-grained stainless Cr-Ni steel. Phys. Met. Met. 2015, 116, 1270-1278.
5. Verma D.P., Pandey S.A., Bansal A., Upadhyay Sh., Mukhopadhyay N.K., Sastry G.V.S., Manna, R. Bulk Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel Processed by Equal-Channel Angular Pressing Followed by Flash Annealing. J. Mater. Eng. Perform. 2016, 25, 5157-5166.
6. Eivania A.R., Mirzakoochakshirazib H.R., Jafariana H.R. Investigation of joint interface and cracking mechanism of thick cladding of copper on aluminum by equal channel angular pressing (ECAP) // Journal of Materials Research and Technology. 2020, Vol. 9 (3), pp. 3394-3405.
7. Volokitin A., Volokitina I., Panin E., Naizabekov A., Lezhnev S. Strain state and microstructure evolution of AISI-316 austenitic stainless steel during high-pressure torsion (HPT) process in the new stamp design // Metalurgija. 2021. 60 (3-4). Pp. 325-328.
8. Volokitin A., Naizabekov A., Volokitina I., Lezhnev S., Panin E. Thermomechanical treatment of steel using severe plastic deformation and cryogenic cooling. Mater.Lett.2021, 304, 130598.
9. Kapsarov A.G., Belsky S.E., Chigrinova N.M. Features of calculation of elements of testing equipment to obtain complex stress state in a wide range of frequencies // Modern methods of machine design: Proceedings of II International Conference. – Mn., 2004. – Vol. 4. – Pp. 242-245.