

УДК 634.377.2

doi:10.18720/SPBPU/2/id-160

М.Н. Пищов¹, С.Е. Бельский²

ИЗУЧЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С УПРОЧНЕННЫМИ СЛОЯМИ И ПОКРЫТИЯМИ



¹Михаил Николаевич Пищов,
Белорусский государственный технологический университет
Республика Беларусь, Минск
Тел.: (8029)570-7276, E-mail: Mikhail_pishchou@mail.ru



²Сергей Евграфович Бельский,
Белорусский государственный технологический университет
Республика Беларусь, Минск
Тел.: (8029)110-1793, E-mail: s.belsky@mail.ru

Аннотация

В статье изучены изменения ряда физико-механических характеристик конструкционной стали при проведении усталостных испытаний. Испытания проводились в условиях знакопеременного изгиба с использованием различных частот нагружения 3,0 кГц - 18,0 кГц на образцах, прошедших поверхностное упрочнение боросилицированием. Изучены усталостные характеристики конструкционных сталей с упрочненными слоями и покрытиями при различных температурно-временных параметрах процесса упрочнения. Определено, что для обеспечения повышенного эксплуатационного ресурса деталей машин, работающих при высоких динамических нагрузках, необходимо применение методов упрочнения, позволяющих получить упрочненные слои с высокой твердостью, износостойкостью и усталостными характеристиками. Установлено, что предложенный процесс поверхностного упрочнения принципиально не меняет особенности развития усталостной повреждаемости конструкционной стали в рассмотренном диапазоне частот испытаний.

Ключевые слова: поверхностные слои, образцы, твердость, конструкционные стали, испытания, усталостное разрушение, усталостные трещины, поверхностное упрочнение, микротвердость, дислокации.

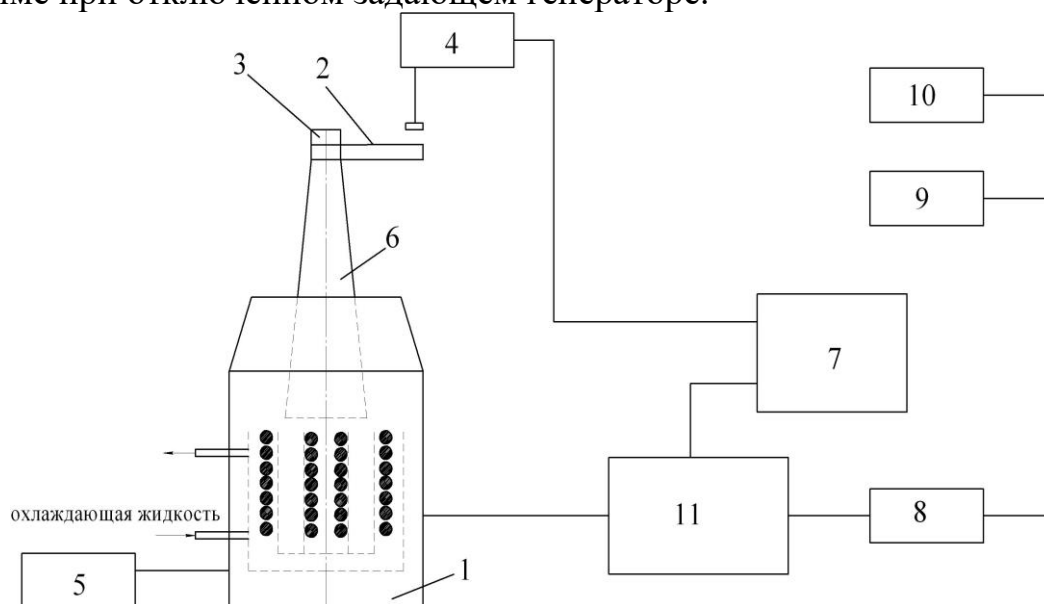
Введение

Условия эксплуатации многих деталей машин, элементов конструкций и технологической оснастки характеризуются циклическими нагрузками широкого диапазона частот. Материалы для изготовления таких изделий должны обладать высокими усталостными характеристиками, а также износостойкостью [13,15]. Установлено, что при значительных контактных нагрузках (характерных, например, для зубчатых передач) усталостное выкрашивание, как правило, развивается в поверхностном слое [4,5]. Для повышения эксплуатационного ресурса таких деталей большое значение имеет правильный выбор процессов диффузионного упрочнения и определение рациональных температурно-временных параметров процесса. Подобные исследования имеют большое значение, поскольку ряд процессов диффузионного насыщения, например, борирование, способствует возрастанию микрохрупкости поверхностного слоя, что нежелательно для деталей машин, работающих в условиях динамического нагружения. Большинство теоретических и экспериментальных исследований развития процесса усталостного разрушения выполнено без учета структурных и металлургических факторов, наличия упрочненных слоев и покрытий; тем самым затрудняется подбор оптимальных технологических параметров процессов поверхностного упрочнения [1]. Недостаточно изучено влияние наиболее распространенных технологических процессов химико–термической обработки сталей (цементации, азотирования, борирования) на дислокационную структуру поверхностных слоев деталей из конструкционных сталей и ее трансформацию в ходе последующей эксплуатации, а также и усталостные характеристики сталей. Исследования проводимые в этом направлении могут обеспечить совершенствование составов и режимов поверхностного упрочнения и следовательно повышение эксплуатационной долговечности изделий [2,3].

Целью и задачами проведенных исследований являлось определение оптимальных температурно-временных параметров процесса боросилицирования, позволяющего значительно повысить эксплуатационный ресурс изучаемых зубчатых передач, работающих при высоких нагрузках, и технологической оснастке. Для правильного выбора данных параметров необходимо проведение дополнительных испытаний на усталостную прочность упрочненных слоев и покрытий, а также изучение физико-механических характеристик конструкционной стали при проведении усталостных испытаний. В связи со значительной длительностью и трудоемкостью традиционных низкочастотных испытаний упрочненных образцов, в работе использовались методики ускоренного определения характеристик усталости материалов.

Методика проведения усталостных испытаний

Для осуществления высокочастотного нагружения был использован комплекс магнестрикционных резонансных установок [6], позволяющий проводить испытания различных конструкционных материалов на разных частотах (3 кГц – 18 кГц) и температур (300 – 1000°K). Принципиальная схема установки разработанной на базе магнестрикционного преобразователя приведена на рисунке 1. Механические колебания пакета возникают под воздействием переменного магнитного поля, возбуждаемого высокочастотным генератором. Эффективная работа магнестрикционного преобразователя 1 (рисунок 1) обеспечивается оптимальным уровнем подмагничивания постоянным полем. С целью увеличения амплитуды колебаний к пакету присоединялся стержень-концентратор переменного сечения 6, к которому в свою очередь, присоединяется образец 2 с помощью устройства крепления 3. Все размеры элементов данной системы выполнялись с одинаковой собственной частотой, что позволяло при работе установки на данной резонансной частоте получать в образце максимальные значения амплитуды циклических напряжений. Питание преобразователей высокочастотным током производилось либо от усилителя типа УПВ-5 (частоты 3,0 и 9,0 кГц), либо от штатных усилительных блоков генераторов УЗГ-2-4М (частота 18 кГц) 11, для чего была проведена их модернизация, позволяющая осуществлять работу в автоколебательном режиме при отключенном задающем генераторе.



1 – магнестрикционный преобразователь с катушками возбуждения и подмагничивания, 2 – образец, 3 – устройство крепления, 4 – виброметр МРТИ, 5 – модуль подмагничивания, 6-концентратор-волновод, 7 – прибор стабилизации амплитуды (ПСА), 8 – частотомер, 9 – осциллограф,

10 – устройство вывода на печать, 11 – усилитель и генератор сигнала

Рис. 1. Принципиальная схема высокочастотного испытательного стенда

На корректность результатов усталостных испытаний влияет стабилизация амплитуды колебаний в процессе нагружения. Особенно остро этот вопрос стоит при использовании резонансного режима, так как изменение амплитуды колебаний может быть вызвано как изменением акустической мощности, подводимой к образцу, так и несовпадением частоты механического резонанса колебательной системы, обладающей острой характеристикой, с частотой тока генератора применяемого в схеме с независимым возбуждением. В связи с этим используются установки с автоколебательным режимом работы, позволяющие по изменению резонансной частоты отслеживать кинетику повреждаемости образца [8, 10].

После термической и химико-термической обработки с целью снятия верхнего дефектного слоя и получения необходимой величины шероховатости ($R_a \sim 0,32$ мкм) рабочих поверхностей образцов, их подвергали электролитическому полированию [7]. Затем производилась отбраковка по наличию поверхностных повреждений и разбиение образцов на группы по геометрическим параметрам. При измерении исходных значений физико – механических характеристик (например, электросопротивления) производилась дополнительная отбраковка при выявлении резко отличающихся результатов измерений.

Использование при реализации знакопеременного изгиба в качестве образцов балочек постоянного сечения значительно облегчило проведение эксперимента, т.к. появлялась возможность на одном образце получать множество величин циклических напряжений [11]. Улучшение механического контакта в системе и уменьшение возможности возникновения фреттинг – коррозии в заделке при длительном нагружении обеспечивалось использованием в качестве прокладок под контактные поверхности образца мелкозернистой наждачной бумаги.

Общий вид использовавшихся образцов для проведения исследований при нагружении знакопеременным изгибом приведены в соответствии с рисунком 2.

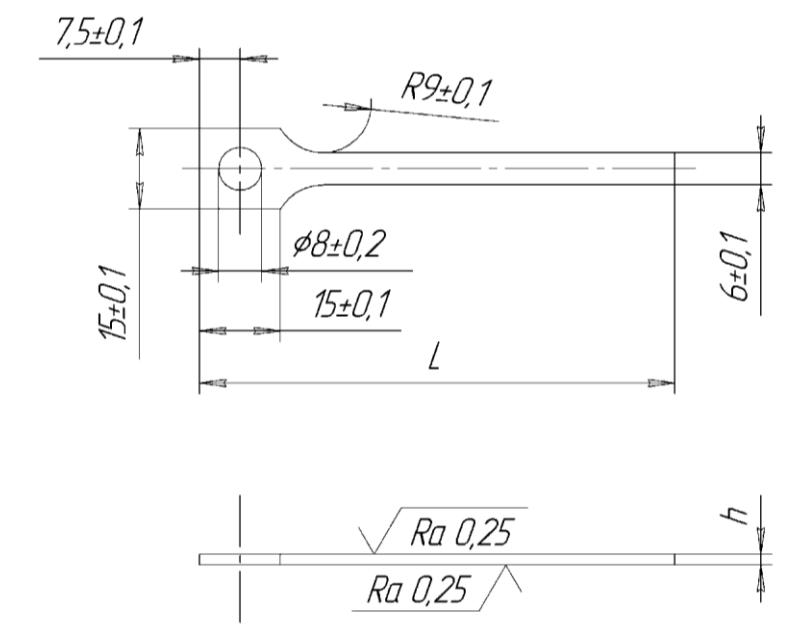


Рис. 2. Образцы для нагружения знакопеременным изгибом

При усталостных испытаниях с нагружением знакопеременным изгибом весьма актуальным является уточнение величины циклических напряжений, действующих в опасном сечении образца, действительная величина которых в значительной степени зависит от способа закрепления образцов, формы переходного участка и т.д. Использование координат характерных точек (узла колебаний – места расположения нулевой линии и пучности напряжений – места расположения усталостных трещин) позволило уточнить напряженно – деформированное состояние образца. Общий вид образца с трещиной представлен на рисунке 3.

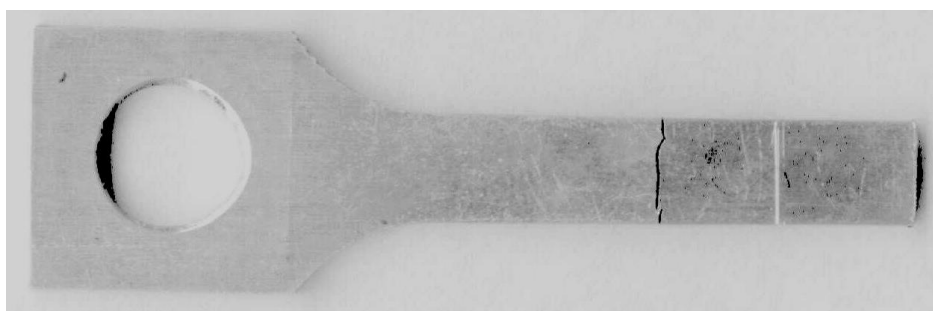


Рис. 3. Образец после нагружения знакопеременным изгибом (частота испытаний 18кГц, вторая форма собственных колебаний)

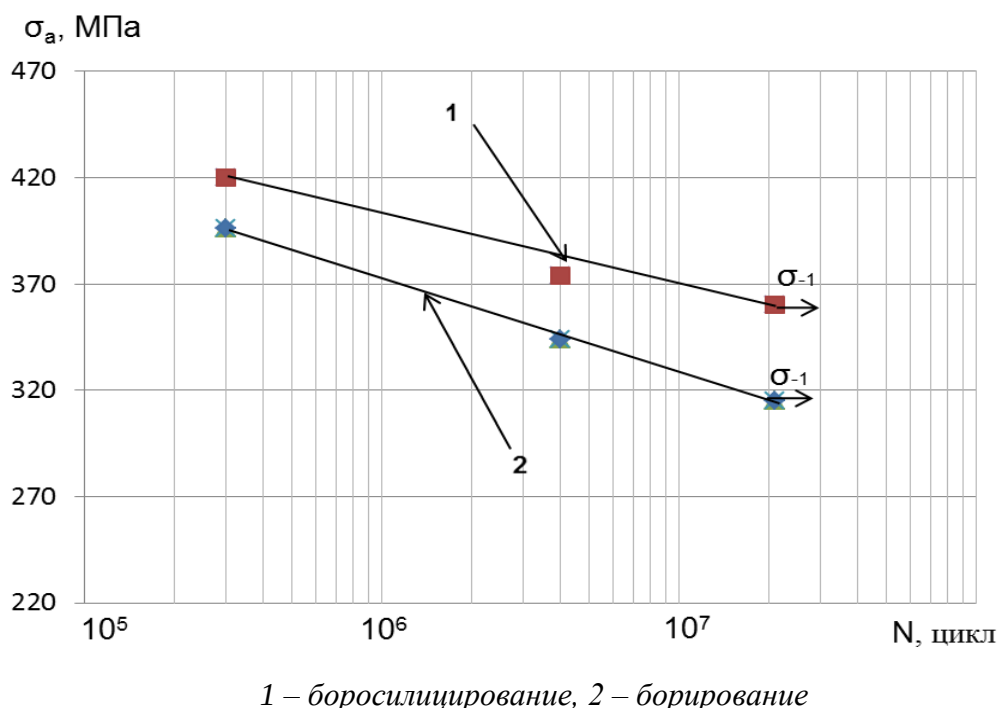
Для оценки усталостных характеристик, обеспечиваемых поверхностным упрочнением, проведены сравнительные испытания образцов из стали 40Х, прошедших улучшение с закалкой ТВЧ, и образцов, прошедших боросилицирование, в условиях знакопеременного изгиба на частоте 17,9 кГц в условиях резонансного нагружения [5]. Нагружение всех образцов проводилось до появления усталостной

трещины заданного размера, возникновение которой оценивали по падению резонансной частоты колебаний.

Основные результаты

В ходе проведения исследований было установлено увеличение усталостных характеристик для образцов, упрочненных борированием и боросилицированием (рисунки 4 – 6). Связано это главным образом с образованием в поверхностных упрочненных слоях остаточных напряжений сжатия. С увеличением времени и температуры насыщения наблюдается снижение усталостных характеристик образцов при упрочнении борированием (рис.5). При боросилицировании отмечается незначительное уменьшение при времени насыщения 4 – 4,5 часов и температуры обработки 1050°C.

Уменьшение усталостных характеристик образцов при борировании по сравнению с боросилицированием, связано главным образом с образованием в упрочненном слое хрупкой фазы FeB [12]. Повышение времени обработки свыше 2,5 часов приводит к постепенному снижению величины $N_{ц}$ вследствие коагуляции фазы Fe_2B , а также как уже отмечалось образования в поверхностном слое фазы FeB . По этой причине при использовании традиционного процесса борирования (без дополнительного введения кремния) существенное снижение усталостной долговечности наблюдается уже после обработки в насыщающей смеси в течение 3,0 часов.



1 – боросилицирование, 2 – борирование
Рис. 4. Усталостные кривые образцов стали 40X при знакопеременном изгибе (температура насыщения $T = 950^{\circ}\text{C}$, время упрочнения 4,5 часа)

Повышение плотности поверхностного слоя, получаемого при боросилицировании, а также отсутствие фазы FeB приводит к существенному снижению по сравнению с борированием его микрохрупкости, что обеспечило возрастание его усталостных характеристик [14].

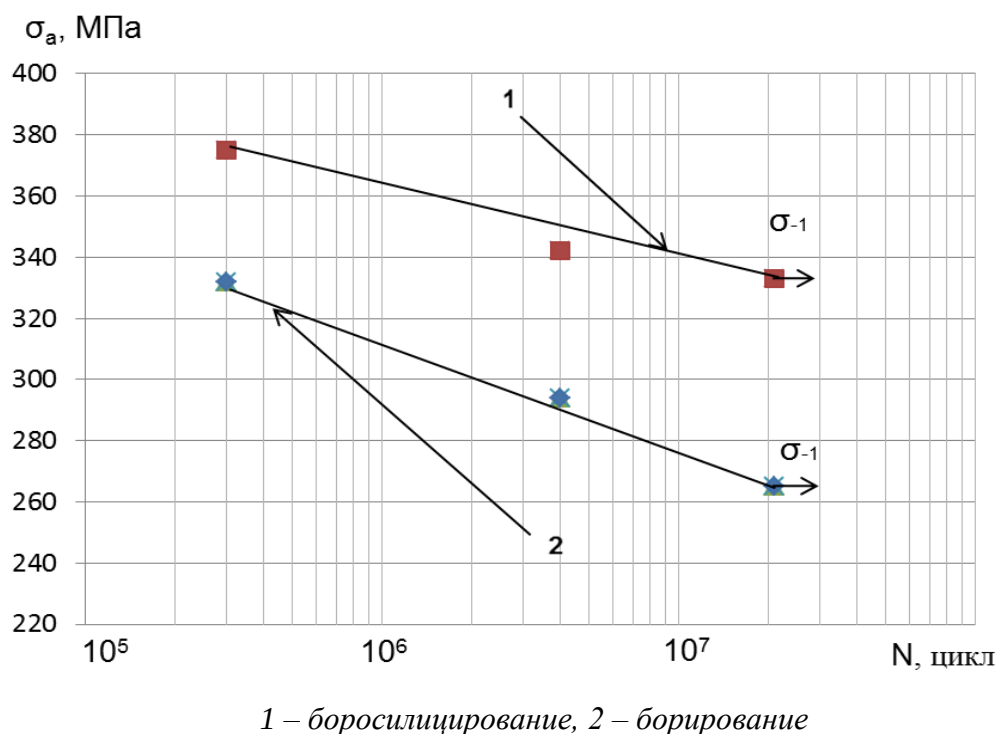
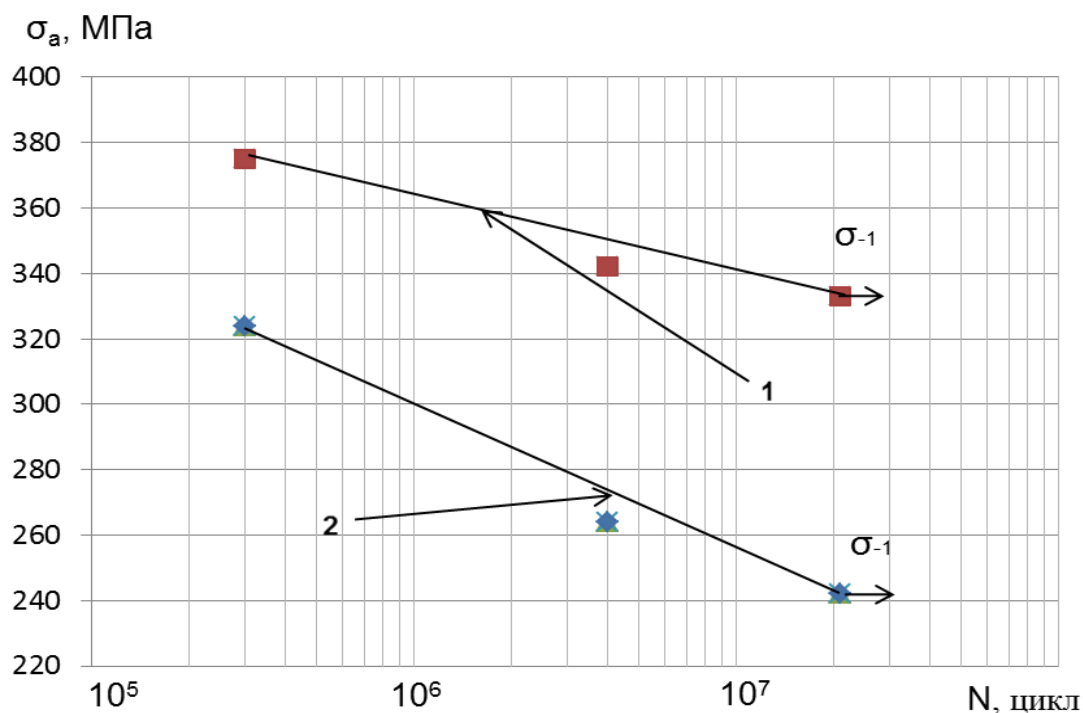


Рис. 5. Усталостные кривые образцов стали 40X при знакопеременном изгибе (температура насыщения $T = 1050^{\circ}\text{C}$, время упрочнения 4,5 часа)

Преобладание в поверхностном слое фазы Fe_2B способствовало как существенному повышению $N_{ц.}$, так и стабильности данной характеристики при возрастании времени упрочнения до 3 – 4,5 часов. Высокая чувствительность упрочненных борированием поверхностных слоев к изменению температуры и времени насыщения связано как уже отмечалось выше образованием фазы FeB . При исследовании усталостных характеристик образцов из стали 25ХГТ было установлено их увеличение по сравнению со сталью 40X [16-17].



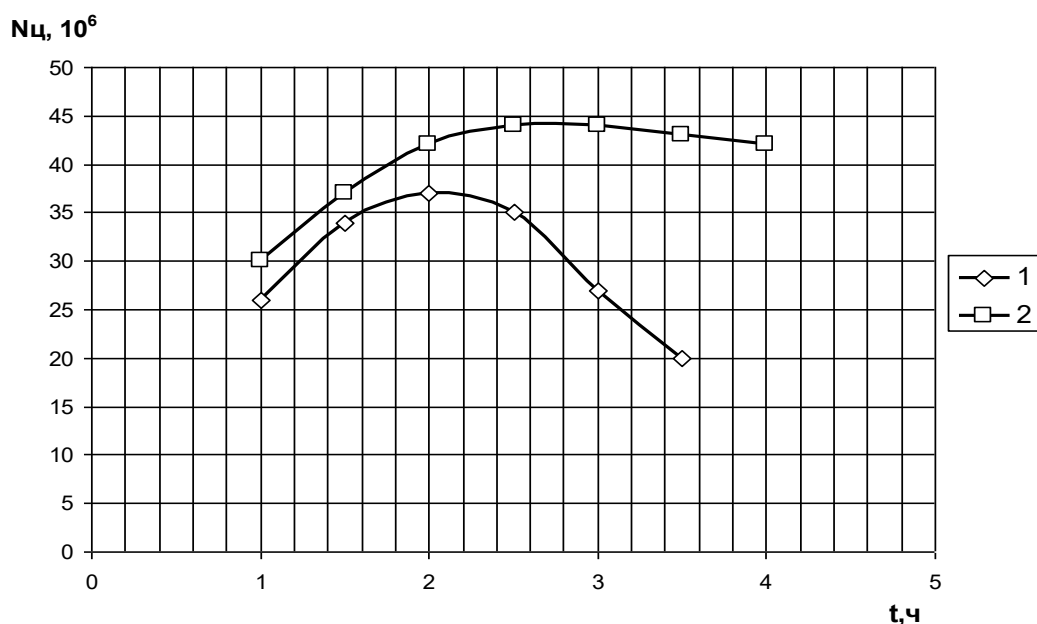
1 – боросилицирование, 2 – цементация

Рис. 6. Усталостные кривые образцов стали 40X при знакопеременном изгибе (температура насыщения $T = 1050^\circ\text{C}$, время упрочнения 4,5 часа)

Связано это в первую очередь с содержанием в составах исследуемых сталей углерода. Установлено, что с увеличением времени и температуры насыщения при боросилицировании повышаются усталостные характеристики образцов стали 25ХГТ [17]. Увеличение усталостных характеристик связано с образованием в поверхностных слоях при боросилицировании остаточных напряжений сжатия [9].

Как видно из приведенных данных (рис. 4-6), боросилицирование обеспечивает значительный рост усталостной долговечности при различных уровнях нагружения, что можно объяснить наличием значительных напряжений сжатия в поверхностном слое [9]. Следует отметить, что данный процесс благоприятно влияет на усталостные характеристики как традиционно цементуемой стали 25ХГТ [17], так и среднеуглеродистой стали 40X, что свидетельствует о его универсальности и возможности замены ряда сталей на менее дорогие и дефицитные.

Также в ходе испытаний в условиях знакопеременного изгиба были определены оптимальные параметры по температуре насыщения и времени насыщения образцов при борировании и боросилицировании (рис. 7).



1 – борирование, 2 – боросилицирование

Рис. 7. Влияние состава смеси и длительности поверхностного упрочнения на усталостные характеристики стали 40 X

Выводы

Таким образом, было установлено, что в связи со значительной длительностью и трудоемкостью традиционных низкочастотных испытаний применяемых в настоящее время упрочненных образцов конструкционных сталей, использование методики ускоренного определения характеристик усталости является наиболее актуальной.

Для оценки усталостных характеристик, обеспечиваемых поверхностным упрочнением, проведены сравнительные испытания образцов из стали 40X в условиях знакопеременного изгиба на частоте 17,9 кГц в условиях резонансного нагружения.

Установлено, что оптимальным для повышения усталостных характеристик при борировании является время насыщения 1,5-2,5 часа при температуре процесса 900-1050°C. При этом образуется упрочненный слой толщиной 70-100 мкм достаточной для работы зубчатых передач трансмиссий в условиях интенсивного изнашивания и динамических нагрузок.

Повышение времени обработки свыше 2,5 часов приводит к постепенному снижению величины $N_{ц}$ вследствие коагуляции фазы Fe_2B , а также образования в поверхностном слое фазы FeB , обладающей повышенной хрупкостью [14]. По этой причине при использовании традиционного процесса борирования существенное снижение усталостной долговечности наблюдается уже после обработки в насыщающей смеси в течение 3,0 часов вследствие образования крупных

игл FeВ и общей разрыхленности поверхностного слоя, выявляемой микроструктурным анализом.

Повышение плотности поверхностного слоя, получаемого при боросилицировании, существенное снижение по сравнению с борированием, его микрохрупкости обеспечило возрастание усталостных характеристик. Преобладание в поверхностном слое фазы Fe₂В обеспечило как существенное повышение N_ц так и стабильность данной характеристики при возрастании времени упрочнения до 3-4 часов, что может быть необходимым для получения более толстого диффузионного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Naizabekov A., Lezhnev S., Volokitina I., Panin E., Pishchov M., Belsky S. Investigation of the effect of combined thermomechanical processing on the brass microstructure evolution and the microhardness change // *Metalurgija*, 63 (2024) –283-286.
- [2] Andrey Volokitin, Irina Volokitina, Abdrakhman Naizabekov, Dmitry Kuis, Sergey Lezhnev, Evgeniy Panin FATIGUE PROPERTIES AND TRIBOLOGICAL TESTS OF AISI 316 STEEL AFTER HIGH PRESSURE TORSION // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 58, 2, 2023, 412-419.
- [3] Stepankin, I., Naizabekov, A., Kuis, D., Lezhnev, S., Panin, E. Universal method for compact fatigue determination // *MethodsX*, 14, 2025, 7 pages.
- [4] Бельский С.Е., Пищов М.Н., Адель Рашид. Исследование процесса развития усталостного разрушения конструкционных сталей с поверхностным упрочнением // Республиканский межведомственный сборник научных трудов: Машиностроение, Минск. – 2024. С. 254-259.
- [5] Царук, Ф.Ф. К методике исследования усталостных свойств конструкционных материалов./ Ф.Ф.Царук, С.Е.Бельский, А.В.Блохин //Труды БГТУ, серия П. 2004. Вып. XI. - С. 233-236.
- [6] Блохин, А.В. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования. / А.В.Блохин, Ф.Ф.Царук, Н.А.Гайдук//Труды БГТУ, серия П, Мн., вып. X. - С.213-215.
- [7] Бельский, С.Е. Влияние параметров диффузионного упрочнения на шероховатость поверхности обработанных деталей и стабильность их размеров // Труды БГТУ. Сер.П лесн. и деревообраб. пром-сти. 2002. - Вып. X. - С. 204-207.
- [8] Довгялло, И.Г. Влияние механических колебаний на качество диффузионного слоя стальных деталей при низкотемпературной карбонитрации. / И.Г.Довгялло, Б.А.Каледин, А.И.Сурус,

- С.Е.Бельский // Труды БГТУ. Сер. II лесн. и деревообраб. пром-сти. 2000. - Вып. II. - С. 207-213.
- [9] Пищов М.Н. Исследование в поверхностных упрочненных слоях конструкционных сталей остаточных напряжений / М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 24 января–16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. С.2033-206.
- [10] Пищов М.Н. Влияние высокочастотных механических колебаний при поверхностном упрочнении на формирование и структуру упрочненных слоев конструкционных сталей. / М.Н. Пищов, С.Е.Бельский, А.И.Сурус // Литье и металлургия. 2003. - № 2. - С.124-127.
- [11] Блохин, А.В. Разработка конструкции крепления образца для усталостных испытаний в условиях знакопеременного изгиба / А.В.Блохин, С.Е. Бельский, М.Н. Пищов // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 24 января–16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. С.313-316.
- [12] Бельский, С.Е. Влияние состава насыщающей смеси при комплексном борировании на структуру и свойства поверхностных слоев / Бельский, М.Н. Пищов // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 24 января–16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. С.288-303.
- [13] Симанович, В.А. Особенности эксплуатационных режимов нагружения лесных агрегатных машин / В.А. Симанович, М.Н. Пищов, А.И. Смеян // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2007. – Вып. XV. – С. 77–78.
- [14] Григоров, П.К. Методика определения хрупкости борированного слоя / П.К. Григоров, А.И. Катханов // Повышение надежности и долговечности деталей машин. – Ростов на Дону, 1972. – Вып. 16. – С. 97–98.
- [15] Макаревич, С.С. Модель напряженного состояния зубьев деталей трансмиссий трелевочных тракторов / С.С. Макаревич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 327–330.
- [16] Ситкевич, М.В. Структура и свойства поверхностных слоев зубчатых передач, упрочненных комплексным борированием / М.В. Ситкевич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Технологии ремонта, восстановления и

упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2008 г. – СПб., 2008. – Ч. 2. – С. 346–353.

- [17] Ситкевич, М.В. Влияние комплексного боридного упрочнения на структуру и свойства поверхностных слоев сталей для изготовления деталей зубчатых передач трелевочных лесных машин / М.В. Ситкевич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Литье и металлургия. – 2008. – С. 140–146.

M.N. Pishchov, S.E. Belsky

STUDY OF FATIGUE CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL STEELS WITH HARDENED LAYERS AND COATINGS

Belarusian State Technological University Republic of Belarus, Minsk

Abstract

The article studies changes in a number of physical and mechanical characteristics of structural steel during fatigue testing. The tests were carried out under alternating bending conditions using different loading frequencies of 3.0 kHz - 18.0 kHz on samples that had undergone surface hardening by borosilicate coating. The fatigue characteristics of structural steels with hardened layers and coatings were studied at different temperature-time parameters of the hardening process. It was determined that in order to ensure an increased service life of machine parts operating under high dynamic loads, it is necessary to use hardening methods that make it possible to obtain hardened layers with high hardness, wear resistance and fatigue characteristics. It was established that the proposed surface hardening process does not fundamentally change the features of the development of fatigue damage to structural steel in the considered range of test frequencies. *Key words:* surface layers, samples, hardness, structural steels, testing, fatigue failure, fatigue cracks, surface hardening, microhardness, dislocations.

REFERENCES

- [1] Naizabekov A., Lezhnev S., Volokitina I., Panin E., Pishchov M., Belsky S. Investigation of the effect of combined thermomechanical processing on the brass microstructure evolution and the microhardness change // *Metalurgija*, 63 (2024) –283-286.
- [2] Andrey Volokitin, Irina Volokitina, Abdrakhman Naizabekov, Dmitry Kuis, Sergey Lezhnev, Evgeniy Panin **FATIGUE PROPERTIES AND**

TRIBOLOGICAL TESTS OF AISI 316 STEEL AFTER HIGH PRESSURE TORSION // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 58, 2, 2023, 412-419.

- [3] Stepankin, I., Naizabekov, A., Kuis, D., Lezhnev, S., Panin, E. Universal method for compact fatigue determination // MethodsX, 14, 2025, 7 pages.
- [4] Belsky S.E., Pishov M.N., Adel Rashid. Study of the process of fatigue failure development in structural steels with surface hardening // Republican interdepartmental collection of scientific papers: Mechanical Engineering, Minsk. - 2024. Pp. 254-259.
- [5] Tsaruk, F.F. On the methodology for studying the fatigue properties of structural materials. / F.F. Tsaruk, S.E. Belsky, A.V. Blokhin // Proceedings of BSTU, series P. 2004. Issue XI. - Pp. 233-236.
- [6] Blokhin, A.V. Complex of equipment for fatigue testing of process equipment elements. / A.V. Blokhin, F.F. Tsaruk, N.A. Gaiduk // Proceedings of BSTU, series P, Mn., issue. X. - P.213-215.
- [7] Bel'skiy, S.E. Influence of diffusion hardening parameters on the surface roughness of processed parts and stability of their dimensions // Proceedings of BSTU. Series II forestry and woodworking industry. 2002. - Issue X. - P.204-207.
- [8] Dovgyallo, I.G. Influence of mechanical vibrations on the quality of the diffusion layer of steel parts during low-temperature carbonitriding. / I.G.Dovgyallo, B.A.Kaledin, A.I.Surus, S.E.Bel'skiy // Proceedings of BSTU. Series II forestry and woodworking industry. 2000. - Issue II. - P.207-213.
- [9] Pishchev M.N. Study of residual stresses in surface hardened layers of structural steels / M.N. Pishchov, S.E. Belsky // Forest engineering, materials science and design: Proceedings of the 88th scientific and technical conference of faculty, researchers and postgraduate students, Minsk, January 24–February 16, 2024 – Minsk: BSTU, 2024. Pp.2033–206.
- [10] Pishchov M.N. Effect of high-frequency mechanical vibrations during surface hardening on the formation and structure of hardened layers of structural steels. / M.N. Pishchov, S.E. Belsky, A.I. Surus // Casting and metallurgy. 2003. – No. 2. – Pp.124–127.
- [11] Blokhin, A.V. Development of a sample fastening design for fatigue testing under alternating bending conditions / A.V. Blokhin, S.E. Belsky, M.N. Pishchov // Forest engineering, materials science and design: materials of the 88th scientific and technical conference of the faculty, research staff and postgraduate students, Minsk, January 24–February 16, 2024. – Minsk: BSTU, 2024. pp. 313–316.
- [12] Belsky, S.E. Influence of the composition of the saturating mixture during complex boriding on the structure and properties of surface layers / Belsky, M.N. Pishchov // Forest engineering, materials science and design:

- materials of the 88th scientific and technical conference of the faculty, research staff and postgraduate students, Minsk, January 24–February 16, 2024. – Minsk: BSTU, 2024. pp. 288–303.
- [13] Simanovich, V.A. Features of operational loading modes of forestry aggregate machines / V.A. Simanovich, M.N. Pishchev, A.I. Smeyan // Proceedings of BSTU. Series. II, Forestry and woodworking industry. - 2007. - Issue XV. - Pp. 77-78.
 - [14] Grigorov, P.K. Methodology for determining the brittleness of the borated layer / P.K. Grigorov, A.I. Katkhanov // Improving the reliability and durability of machine parts. - Rostov-on-Don, 1972. - Issue 16. - Pp. 97-98.
 - [15] Makarevich, S.S. Model of the stress state of the teeth of transmission parts of skidder tractors / S.S. Makarevich, M.N. Pishchev, S.E. Belsky // Proceedings of BSTU. Series. II, Forestry and woodworking industry. – 2009. – Issue XVII. – P. 327–330.
 - [16] Sitkevich, M.V. Structure and properties of surface layers of gears strengthened by complex boriding / M.V. Sitkevich, M.N. Pishchev, S.E. Belsky // Technologies of repair, restoration and strengthening of machine parts, mechanisms, equipment, tools and technological tooling: Proc. 10th Int. scientific-practical. conf., St. Petersburg, April 15–18, 2008 – St. Petersburg, 2008. – Part 2. – P. 346–353.
 - [17] Sitkevich, M.V. The influence of complex boride hardening on the structure and properties of surface layers of steels for the manufacture of gear parts for forestry skidding machines / M.V. Sitkevich, M.N. Pishchev, S.E. Belsky // Casting and metallurgy. - 2008. - P. 140-146.