УДК 669-179:539.4

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ Долговечность высокохромистой стали 40х13, обработанной интенсивными потоками ионов Азота

В.А. КУКАРЕКО, доктор физ.-мат. наук (ГНУ ОИМ НАН Беларуси, г. Минск)

Поступила 15 июня 2015 Рецензирование 10 июля 2015 Принята к печати 7 августа 2015

Кукареко В.А. – 220072, г. Минск, ул. Академическая, 12, Республика Беларусь Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», e-mail; v kukareko@mail.ru

Исследовано влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и циклическую долговечность высокохромистой мартенситной стали 40Х13. Установлено, что обработка стали интенсивными потоками ионов азота эффективно повышает ее микротвердость и сопротивление усталостному разрушению в области многоцикловой усталости. Сделано заключение, что на циклическую долговечность большое влияние оказывает уровень действующих в поверхностных слоях напряжений сжатия. Наиболее высокие уровни напряжений сжатия и циклической долговечности достигаются в результате ионной обработки стали при 670 К, обеспечивающей наряду с образованием нитридов также и высокую концентрацию растворенного в матричной фазе азота.

Ключевые слова: сталь 40Х13, ионно-лучевое азотирование, фазовый состав, циклическая долговечность.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-99-106

Введение

Сопротивление разрушению под воздействием циклических деформаций является одной из важнейших механических характеристик конструкционных материалов [1]. Поскольку усталостная трещина зарождается как правило в поверхностных слоях, то модифицирование поверхности является перспективным способом увеличения выносливости металлических материалов [1–3]. Многочисленные исследования влияния высокоэнергетической ионно-лучевой обработки на усталость конструкционных материалов свидетельствуют о том, что внедрение ионов различных элементов замедляет кинетику зарождения и распространения усталостных трещин и существенно повышает циклическую долговечность модифицированных материалов [4]. Новые перспективы открывает применение низкоэнергетических ионно-лучевых технологий с использованием пучков заряженных частиц высокой плотности [4, 5]. В частности, использование потоков ускоренных ионов азота с энергией 2...3 кэВ и плотности ионного тока j = 1...2 мА/см позволяет при сравнительно кратковременном облучении (1,5...2 ч) получать флюенс легирования ~3...4·10¹⁹ ион·см⁻² и достигать в поверхностных слоях облучаемых материалов сверхвысокую концентрацию азота (~30 ат.%) [4, 6, 7]. В процессе ионно-лучевой обработки металлических материалов за счет радиационно-стимулированной диффузии азот транспортируется в глубокие подповерхностные слои и модифицирует их [4-8]. Вместе с тем

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

См

эффективность использования метода ионнолучевого азотирования для повышения выносливости сталей и сплавов, а также особенности усталостного разрушения материалов, подвергнутых обработке ионами азота, изучены недостаточно. В связи с этим представляет интерес исследование влияния ионно-лучевого азотирования на циклическую долговечность высокохромистой стали мартенситного класса 40X13, широко используемой для изготовления режущего и мерительного инструмента, пружин, клапанных пластин и других деталей, работающих в агрессивных средах [9].

Материал и методика исследования

Исследование проводилось на пластинчатых образцах, изготовленных из листового проката стали 40Х13 (ГОСТ 5582-75). Ионно-лучевая обработка образцов проводилась на ускорителе ионов, оснащенном источником с замкнутым дрейфом электронов УВН-2М, разработанном в ФТИ НАН Беларуси [10]. Энергия ионов азота составляла 1...3 кэВ и плотность ионного тока 2 мА/см². Флюенс легирования составлял $\sim 3 \cdot 10^{19}$ см⁻². Температура образцов в процессе ионно-лучевой обработки поддерживалась на уровне 670 и 770 К. Испытания на циклическую долговечность осуществлялись на установке УИП-2 по методу симметричного поперечного изгиба консольно закрепленных пластинчатых образцов (ГОСТ 23026-78) с размерами рабочей части 55×15×2,2 мм. Амплитуда циклических деформаций составляла *e*_a = 0,32...0,59 %, что соответствовало напряжениям $\sigma_a = 600...1100$ МПа.

Исследование структурного состояния и фазового состава исследуемых образцов стали 40Х13 проводилось с использованием рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном СоК_{α} излучении. Съемка образцов осуществлялась при ускоряющем напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Запись интенсивности рассеянного рентгеновского излучения проводилась в режиме сканирования (по точкам) с фиксированным временем счета 15 с на точку. Шаг сканирования составлял 0,1°. Фазовый анализ проводился с использованием стандартной базы данных PDF. Для определения напряжений в поверхностных слоях применялся метод рентгеновской тензометрии, основанный на использовании способа наклонной съемки [11]. Расчет напряжений в направлении продольной оси модифицированного азотом пластинчатого образца проводился по формуле

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1+\mu} \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0} \frac{1}{\sin^2 \psi},$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; ψ – угол наклона; d_{ψ} – межплоскостное расстояние для дифракционной линии (220) матричной α -фазы, снятой под углом ψ = 50°, d_0 – межплоскостное расстояние для дифракционной линии (220), снятой под углом ψ = 0°. При расчете σ_{ϕ} для азотированного слоя стали 40X13 использовались следующие упругие константы: E = 210 ГПа, μ = 0,3. Твердость по Виккерсу определялась при нагрузке 295 Н (30 кгс). Микротвердость измерялась при нагрузке 0,196 Н (20 гс) на приборе ПМТ–3.

Результаты и обсуждение

Структура и фазовый состав стали 40Х13. На рис. 1 представлены фрагменты рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев образцов стали 40X13 в исходном закаленном состоянии, а также после ионно-лучевого азотирования при различных температурах. Структурные параметры модифицированных азотом слоев, а также их микротвердость и фазовый состав приведены в таблице. На рис. 2 а, б изображена микроструктура азотированных слоев. Из представленных данных можно видеть, что в результате ионно-лучевой обработки стали 40X13 при 670 К на поверхности образуется модифицированный азотом слой толщиной 12...15 мкм, имеющий микротвердость ≈1700 HV 0,02. Фазовый состав слоя включает в себя нитриды ε-(Fe,Cr)₂₋₃N и γ'-(Fe,Cr)₄N, азотистый мартенсит α_N , а также фазу α'' – (Fe,Cr)₈N, которая формируется на базе азотистого мартенсита и отличается от него упорядоченным расположением азота в кристаллической решетке α-фазы [12]. Кроме этого на дифрактограмме присутствуют дифракционные линии (α-фаза) от неазотированной стальной подложки. Повышенная твердость азотированного слоя обусловлена высокой легированностью нитридных фаз атомами хрома. Ионно-лучевая обработка стали при 770 К

CM



Рис. 1. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев образцов стали 40Х13:

a – исходное состояние (закалка);
б-обработка ионами азота при 670 К;
 e – то же при 770 К

Структурные параметры, фазовый состав и напряженное состояние поверхностных слоев ионно-модифицированной азотом стали 40X13

Предвари- тельная обработка	Режим обработки	Глубина слоя, мкм	Микротвердость, HV 0,02	Фазовый состав	Напряжения в поверхност- ном слое, МПа
Закалка 1130 К (вода)	Закалка	_	650	α-Fe (мартенсит); Cr ₂₃ C ₆ (следы)	~0
	Имплантация N ⁺ при 670 К $(j = 2 \text{ мA/cm}^2, D = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2})$	1015	1700	ε; γ΄; α΄΄; α _N ; α–Fe	-780
	То же при 770 К	3032	1200	α–Fe; CrN	-440

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ



Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя высокохромистой стали 40Х13, обработанной ионами азота при 670 К (*a*) и 770 К (*б*)

приводит к увеличению глубины азотированного слоя до 30...35 мкм. В слое регистрируется присутствие частиц нитрида хрома CrN и матричной α -фазы (рис. 1, *в*). Дифракционные линии α -фазы у обработанной при 770 К стали сильно сужаются, а слой внутреннего азотирования не регистрируется, что указывает на глубокий распад пересыщенного азотом матричного твердого раствора ($\alpha_{\rm N}$ -мартенсита). Микротвердость слоя составляет 1200 HV 0,02.

На рис. З приведены схемы строения диффузионных зон высокохромистой стали 40Х13, прошедшей ионную имплантацию азотом при 670 и 770 К. Результаты рентгеновской тензометрии свидетельствуют о наличии сильных сжимающих напряжений в поверхностном слое модифицированных азотом сталей. Расчетные значения напряжений в поверхностном слое стали 40Х13 составляли: $\sigma_{\phi} = -780$ МПа для $T_{импл} =$ = 670 К и $\sigma_{\phi} = -440$ МПа для $T_{импл} = 770$ К.

Высокий уровень сжимающих напряжений, действующих в модифицированном ионами азота поверхностном слое после обработки при 670 К, обусловлен большой концентрацией азота в матричной α-фазе. В результате высокотемпературного азотирования при 770 К из-за распада азотистого мартенсита и выделения частиц CrN концентрация азота в матричной α-фазе резко падает, и различие удельных атомных объемов матричной фазы в азотированном слое и подложке уменьшается. Последнее приводит к снижению уровня действующих в слое напряжений сжатия.

б

Рис. 3. Строение диффузионной зоны высокохромистой мартенситной стали типа 40X13, прошедшей

а

ионную имплантацию азотом:

 $a-670~{
m K};\, {
m o}-770~{
m K}$

Результаты циклических испытаний. На рис. 4 в координатах о₂-lgN приведены кривые усталости для стали 40X13 в исходном неимплантированном состоянии, а также после обработки ионами азота при 670 и 770 К. Можно видеть, что ионно-лучевое азотирование закаленной стали 40Х13 приводит к существенному повышению усталостной долговечности в области многоцикловой усталости. Интересно отметить, что наибольшее увеличение циклической долговечности зарегистрировано для случая ионной обработки при 670 К. В частности, при напряжениях испытаний 850 МПа число циклов до разрушения обработанной ионами азота при 670 К стали 40Х13 возрастает в ≈10 раз по сравнению с исходной необработанной сталью. При этом предел выносливости (база испытаний 5·10⁶ циклов) увеличивается от 700 МПа $(e_a = 0.35 \%)$ для закаленной неимплантированной стали 40Х13 до 850 МПа (e_a = 0,43 %) для стали 40X13, обработанной ионами азота при 670 К. Поскольку этому же режиму ионной обработки отвечает и наибольший уровень остаточных сжимающих напряжений, действующих в поверхностных слоях, то можно полагать, что именно с действием этого фактора связано увеличение сопротивления усталостному разрушению ионно-модифицированных азотом сталей. Возрастание амплитуды циклических деформаций сопровождается сближением кривых уста-



Рис. 4. Циклическая долговечность стали 40Х13, обработанной интенсивными потоками ионов азота:

 1 – исходное состояние (закалка); 2 – обработка ионами азота при 670 К; 3 – то же при 770 К

лости для модифицированного и немодифицированного материала. В частности, в области малоцикловой усталости выносливость имплантированной азотом стали 40X13 не превышает уровня ее выносливости в исходном неимплантированом состоянии.

При анализе причин увеличения многоцикловой усталости, модифицированной низкоэнергетическими ионами азота стали, необходимо принимать во внимание, что в области малых амплитуд переменных напряжений циклическая долговечность в значительной степени определяется кинетикой зарождения усталостных микротрещин. При этом образование усталостных микротрещин обычно начинается с поверхностных слоев, отличающихся низкой сдвиговой устойчивостью вследствие пониженного уровня энергии межатомных связей, а также высокой плотности вакансий и подвижности дислокаций [13]. Формирование при азотировании модифицированного поверхностного слоя, находящегося в состоянии сжатия и обладающего высокими прочностными характеристиками, блокирует процессы перемещения дислокаций и замедляет образование усталостных микротрещин на поверхности стали при относительно низких амплитудах деформации испытаний (рис. 4). По мере накопления числа циклов нагружения и увеличения длины усталостных микротрещин возрастает концентрация напряжений в их устьях. При достижении трещинами некоторого ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

CM

критического размера они разрушают модифицированный слой и формируют магистральную усталостную трещину. Увеличение амплитуды циклических деформаций сопровождается нарастанием интенсивности пластических сдвигов в неупрочненных подповерхностных слоях, что способствует быстрому накоплению в них усталостных повреждений и снижению уровня сжимающих напряжений, действующих в модифицированном слое. Поскольку концентрация напряжений в устьях микротрещин также возрастает пропорционально амплитуде циклических деформаций [2, 14], то трещины быстро преодолевают упрочненный поверхностный слой и формируют магистральную трещину разрушения. При этом различие в циклической долговечности для модифицированной и немодифицированной стали нивелируется. Увеличение температуры ионной имплантации стали 40X13 до 770 К сопровождается снижением уровня напряжений сжатия, действующих в модифицированном слое, и приводит к некоторому понижению характеристик выносливости стали (рис. 4). Вместе с тем циклическая долговечность модифицированной при 770 К стали 40X13 заметно превышает долговечность необработанного ионами азота материала. Подобные результаты были получены при исследовании сопротивления усталостному разрушению модифицированной ионами азота стали Х18Н10Т [15].

Таким образом, ионно-лучевое азотирование эффективно повышает циклическую долговечность модифицированных хромистых сталей в области многоцикловой усталости за счет замедления процессов образования и распространения усталостных микротрещин. При этом на сопротивление многоцикловому усталостному разрушению большое влияние оказывает уровень действующих в поверхностных слоях напряжений сжатия. Наиболее высокие уровни напряжений сжатия достигаются в результате ионной обработки хромистых сталей при 670 К, обеспечивающей высокую концентрацию растворенного в матричной фазе азота.

Выводы

Исследовано структурно-фазовое состояние и циклическая долговечность обработанной интенсивными потоками азота при 670 и 770 К

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

высокохромистой мартенситной стали 40X13. Установлено, что в результате ионно-лучевой обработки при 670 К в стали формируется упругодеформированный модифицированный азотом слой, содержащий частицы нитридных фаз и азотистый мартенсит. Микротвердость слоя составляет 1700 HV 0,02. Обработка при 770 К приводит к увеличению толщины модифицированного слоя, снижению его микротвердости и макронапряжений. В обработанном ионами азота при 770 К слое регистрируется присутствие частиц CrN.

Показано, что ионно-лучевое азотирование стали 40Х13 приводит к значительному увеличению ее циклической долговечности в области многоцикловой усталости. Наиболее существенное возрастание числа циклов до разрушения в ≈10 раз регистрируется после ионно-лучевого азотирования стали при 670 К. Предел выносливости обработанной при 670 К стали увеличивается до 850 МПа. Сделано заключение, что на сопротивление многоцикловому усталостному разрушению модифицированной ионами азота стали 40X13 большое влияние оказывает уровень действующих в поверхностных слоях напряжений сжатия, обусловленный присутствием в матричной фазе азотированного слоя атомов азота.

Список литературы

1. Klesnil M., Lukas P. Fatigue of metallic materials. - 2nd rev. ed. - Amsterdam: Elsevier, 1992. -270 p. - (Materials science monographs; Vol. 71). -ISBN-10: 0444987231. - ISBN-13: 978-0-444-98723-5.

2. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. - М.: Металлургия, 1977. - 360 с.

3. Davidson D.L., Lankford J. Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanisms and micromechanics // International Materials Reviews. - 1992. - Vol. 37, iss. 1. - P. 45-76. - doi: http://dx.doi.org/10.1179/ imr.1992.37.1.45.

4. Белый А.В., Кукареко В.А., Патеюк А. Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота. -Минск: Белорусская наука, 2007. - 244 с. - ISBN 978-985-08-0793-9.

5. Microstructure of ultrahigh dose nitrogen implanted iron and stainless steel / D.L. Williamson, O. Ozturk, S. Glick, R. Wei, and P.J. Wilbur // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. - 1991. -Vol. 59-60, pt. 2. - P. 737-741. - doi: 10.1016/0168-583X(91)95693-8.

6. A comparative study of beam ion implantation, plasma ion implantation and nitriding of AISI 304 stainless steel / R. Wei, J.J. Vajo, J.N. Mattosian, P.J. ilbur, J.A. Davis, D.L. Williamson, G.A. Collins // Surface and Coatings Technology. - 1996. - Vol. 83, iss. 1-3. - P. 235-242. - doi: 10.1016/0257-8972(95)02825-0.

7. Kukareko V.A., Byeli A.V. Dose rate and microstructure of nitrogen ion-implanted chromium steels // Surface and Coatings Technology. - 2000. - Vol. 127, iss. 2-3. - P. 174-178. - doi: 10.1016/S0257-8972(99)00654-4.

8. Solid-state amorphization of a tool steel by high-current-density, low-energy nitrogen ion implantation / A.V. Byeli, V.A. Kukareko, O.V. Lobodaeva, S.K. Shykh // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. - 1995. - Vol. 103, iss. 4. - P. 533-536. doi: 10.1016/0168-583X(95)01188-9.

9. Конструкционные материалы: справочник / Б.Н. Арзамасов и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. -М.: Машиностроение, 1990. - 688 с. - (Основы проектирования машин).

10. Белый А.В. Высокоинтенсивная низкоэнергетическая имплантация ионов азота // Физическая мезомеханика. - 2002. - Т. 5, № 1. - С. 95.

11. Комяк Н.И., Мясников Ю.Г. Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений. -Л.: Машиностроение, 1972. – 88 с.

12. Jack K.H. The occurrence and crystal structure of α "-iron nitride; a new type of interstitial alloy formed during the tempering of nitrogen-martensite // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. -1951. - Vol. 208, iss. 1093. - P. 216-224. - doi: 10.1098/ rspa.1951.0155.

13. Панин В.Е. Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации // Физическая мезомеханика. -2001. – T. 4, № 3. – C. 5–22.

14. Wilkinson A.J., Roberts S.G., Hirsch P.B. Modelling the threshold conditions for propagation of stage I fatigue cracks // Acta Materialia. - 1998. -Vol. 46, iss. 2. - P. 379-390. - doi: 10.1016/S1359-6454(97)00290-5.

15. Белый А.В., Кукареко В.А., Биленко Э.Г. Сопротивление контактному и усталостному разрушению хромистых сталей, поверхностно легированных ионами азота // Весці Нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. - 2005. -№ 1. – C. 5–9.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE) N 3(68), July – September 2015, Pages 99–106

Structural-phase state and cyclic life of high-chromium steel 40Kh13 processed by intense flows of nitrogen ions

Kukareko V.A., D.Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of Center, e-mail: v_kukareko@ mail.ru, csimt@tut.by

The State Scientific Institution "Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus", Centre of Structural Research and Tribo-Mechanical Test of Materials, 12 Akademicheskaya str., Minsk, 220072, Republic of Belarus

Abstract

The effect of ion-beam nitriding at temperature 670 and 770 K on the structure, phase composition and cyclic durability (fatigue resistance) of high-chromium martensitic steel 40Kh13 is considered. It is shown that the nitrided layer on the steel treated at 670 K contains particles of nitride phases such as ε -(Fe,Cr)₂₋₃N, γ' -(Fe,Cr)₄N, α'' -(Fe,Cr)₈N and the solid solution of nitrogen in martensite. Treatment of the 40Kh13 steel at 770 K leads to formation of the nitrided layer containing CrN nitride particles. The occurrence of compressive stresses the nitrided layers is registered. The highest compressive stresses of 780 MPa are located in the steel 40Kh13 surface layer treated with nitrogen ions at 670 K. It was found that the steel processing by intensive flows of nitrogen ions effectively increases its' micro-hardness and resistance to fatigue failure in the field of high-cycle fatigue. The most efficient increase in the number of cycles to failure is recorded after the nitrogen ion beam processing of the steel at 670 K. The fatigue resistance of the steel treated at 670 K increases up to 850 MPa. It is concluded that the cycle life is greatly influenced by the level of compressive stresses in the surface layers. The highest levels of compressive stress and cyclic durability is achieved by ion processing of the steel at 670 K, which provides both the formation of nitrides and a high concentration of dissolved nitrogen in the matrix phase.

Keywords:

steel 40Kh13, ion-beam nitriding, phase composition, the cyclic durability.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-99-106

References

1. Klesnil M., Lukas P. Fatigue of metallic materials. Materials science monographs. Vol. 71. 2nd rev. ed. Amsterdam, Elsevier Science Publ., 1992. 270 p. ISBN-10: 0444987231. ISBN-13: 978-0-444-98723-5

2. Finkel' V.M. *Fizicheskie osnovy tormozheniya razrusheniya* [Physical basis of braking failure]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 360 p.

3. Davidson D.L., Lankford J. Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanisms and micromechanics. *International Materials Reviews*, 1992, vol. 37, iss. 1, pp. 45–76. doi: http://dx.doi.org/10.1179/imr.1992.37.1.45

4. Byeli A.V., Kukareko V.A., Pateyuk A. *Inzheneriya poverkhnostei konstruktsionnykh materialov kontsentrirovannymi potokami ionov azota* [A surface engineering structural materials with concentrated streams of nitrogen ions]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2007. 244 p. ISBN 978-985-08-0793-9

5. Williamson D.L., Ozturk O., Glick S., Wei R., Wilbur P.J. Microstructure of ultrahigh-dose, nitrogen – implanted iron and stainless steel. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1991, vol. 59–60, pt. 2, pp. 737–741. doi: 10.1016/0168-583X(91)95693-8

6. Wei R., Vajo J.J., Mattosian J.N., Wilbur P.J., Davis J.A., Williamson D.L., Collins G.A. A comparative study of beam ion implantation, plasma ion implantation and nitriding of AISI 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 1996, vol. 83, iss. 1–3, pp. 235–242. doi: 10.1016/0257-8972(95)02825-0

7. Kukareko V.A., Byeli A.V. Dose rate and microstructure of nitrogen ion-implanted chromium steels. *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol. 127, iss. 2–3, pp. 174–178. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00654-4

8. Byeli A.V., Lobodaeva O.V., Shykh S.K., Kukareko V.A. Solid-state amorphization of a tool steel by highcurrent-density, low-energy nitrogen ion implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. *Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1995, vol. 103, iss. 4, pp. 533–536. doi: 10.1016/0168-583X(95)01188-9

9. Arzamasov B.N. et al. *Konstruktsionnye materialy. Spravochnik* [Structural materials. Reference]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 688 p. ISBN 5-217-01112-2

10. Belyi A.V. Vysokointensivnaya nizkoenergeticheskaya implantatsiya ionov azota [High-intensity low-energy ion implantation of nitrogen]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2002, vol. 5, no. 1, p. 95.

11. Komyak N.I., Myasnikov Yu.G. *Rentgenovskie metody i apparatura dlya opredeleniya napryazhenii* [X-ray methods and apparatus for determining the stress]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 88 p.

12. Jack K.H. The occurrence and crystal structure of α "-iron nitride; a new type of interstitial alloy formed during the tempering of nitrogen-martensite. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1951, vol. 208, iss. 1093, pp. 216–224. doi: 10.1098/rspa.1951.0155

13. Panin V.E. Poverkhnostnye sloi nagruzhennykh tverdykh tel kak mezoskopicheskii strukturnyi uroven' deformatsii [Surface layers of solids as a mesoscopic structural level of deformation]. *Fizicheskaya mezomekhanika* – *Physical Mesomechanics*, 2001, vol. 4, no. 3, pp. 5–22.

14. Wilkinson A.J., Roberts S.G., Hirsch P.B. Modelling the threshold conditions for propagation of stage i fatigue cracks. *Acta Materialia*, 1998, vol. 46, iss. 2, pp. 379–390. doi: 10.1016/S1359-6454(97)00290-5

15. Byeli A.V., Kukareko V.A., Bilenko E.G. Soprotivlenie kontaktnomu i ustalostnomu razrusheniyu khromistykh stalei, poverkhnostno legirovannykh ionami azota [Resistance of chromium steels, superficially alloyed by ions of nitrogen, to contact and fatigue failure]. *Vestsi Natsiyanalnai Akademii Navuk Belarusi. Seryja fizika-tjehnichnyh navuk – Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical-Engineering Sciences*, 2005, no. 1, pp. 5–9.

Article history:

Received 15 June 2015 Revised 10 July 2015 Accepted 7 August 2015

106 № 3 (68) 2015