

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

УДК 621.833;621.785.52;621.785.53

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-58-65>

Поступила в редакцию 30.04.2020

Received 30.04.2020

**П. А. Витязь¹, В. И. Моисеенко², А. Г. Сидоренко², М. В. Сотников², Н. Д. Шкатуло²,
Д. И. Харитончик³**

¹*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

³*Министерство промышленности Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

**ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ
ДЛЯ АЗОТИРОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

Аннотация. Обобщен опыт применения известных и новых сталей для повышения технологичности и прочности основных деталей машин, упрочняемых азотированием. Рассмотрены новые подходы к изготовлению зубчатых колес, упрочняемых азотированием как при использовании алюминийсодержащих сталей, так и нового материала – стали 40ХМФА. Для повышения работоспособности и технологичности производства деталей из широко используемой в машиностроении алюминийсодержащей стали 38Х2МЮА разработана принципиально новая технология предварительной термической обработки заготовок деталей – «неполная закалка», обеспечивающая как повышение обрабатываемости и точности крупногабаритных зубчатых колес, так и увеличение прочности из-за устранения хрупкости азотированного слоя. Высокая твердость азотированной поверхности деталей – до 900 НВ – обеспечивает и высокую износостойкость деталей. Шестерни из новой алюминийсодержащей стали 20ХН4МФЮА, твердеющей на стадии азотирования, обладают характеристиками прочности, равными цементированным деталям, что позволяет не только повышать несущую способность ряда изделий, но и существенно упрощать технологию изготовления сложных по форме точных деталей, заменяя цементацию азотированием, исключая тем самым необходимую после цементации финишную операцию – шлифование. Сталь 40ХМФА, не содержащая алюминий, обладает повышенными показателями жаростойкости, прокаливаемости и обрабатываемости деталей, а также характеристиками их упрочненного слоя. Азотированный слой шестерен толщиной 0,5–0,7 мм не содержит хрупких составляющих, что при твердости сердцевины 300–320 НВ исключает его «шелушение» и последующее разрушение деталей. Применение стали 40ХМФА позволяет решать проблемы надежности и ресурса азотированных крупногабаритных зубчатых колес и является перспективным для всего ряда зубчатых колес с внутренним зацеплением, а также деталей подвижных шлицевых зацеплений. Указанные характеристики также в ряде случаев позволяют заменять цементацию шестерен (модуль менее 4 мм) азотированием при использовании стали 40ХМФА.

Ключевые слова: азотирование, сталь 40ХМФА, химико-термическая обработка, зубчатые колеса

Для цитирования: Опыт и перспективы использования конструкционных сталей для азотированных зубчатых колес / П. А. Витязь [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 58–65. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-58-65>

**Pyotr A. Vityaz¹, Vladimir I. Moiseenko², Aleksandr G. Sidorenko², Maksim V. Sotnikov², Natalia D. Shkatulo²,
Dmitry I. Haritonchik³**

¹*Presidium of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

³*Ministry of Industry of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

EXPERIENCE AND PROSPECTS OF USE OF STRUCTURAL STEELS FOR NITRIDATED GEARS

Abstract. The experience of using known and new steels to improve the manufacturability and strength of the main parts of machines, hardened by nitriding, is generalized. New approaches to manufacture of gear wheels hardened by nitriding, both when using aluminum-containing steels and a new material, steel 40ХМФА, are considered. To improve the efficiency and man-

ufacturability of parts production from aluminum-containing steel 38X2MЮА, widely used in mechanical engineering, a fundamentally new technology of preliminary heat treatment of workpieces of parts – “incomplete hardening” has been developed, which provides both an increase in the machinability and accuracy of large-sized gear wheels, and an increase in strength due to the elimination of the brittleness of nitrided layer. The high hardness of the nitrided surface of the parts – up to 900 HV – also ensures high wear resistance of the parts. Gear wheels made of new aluminum-containing steel 20XH4MФЮА solidified at the nitriding stage, have strength characteristics equal to cemented parts, which allows not only increasing the bearing capacity of a number of products, but significant simplification of the technology of manufacturing precise parts that are complex in shape, replacing carburizing with nitriding, thereby eliminating the necessary after-carburizing finishing operation – grinding. Steel 40ХМФА, which does not contain aluminum, has increased heat resistance, hardenability and machinability of parts, as well as the characteristics of their hardened layer. The nitrided layer of gears 0.5–0.7 mm thick does not contain brittle components, which, with a core hardness of 300–320 HB, excludes its “flaking” and subsequent destruction of parts. The use of 40ХМФА steel makes it possible to solve the problems of reliability and service life of large-sized nitrided gears, but it is also promising for the entire range of gears with internal gearing, as well as parts of movable spline gearings. These characteristics also in some cases allow replacing the carburizing of gears (modulus less than 4 mm) by nitriding when using 40ХМФА steel.

Keywords: nitriding, austenitizing, steel 40ХМФА, chemical heat treatment, gear wheels

For citation: Vityaz P. A., Moiseenko V. I., Sidorenko A. G., Sotnikov M. V., Shkatulo N. D., Haritonchik D. I. Experience and prospects of use of structural steels for nitrdated gears. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 58–65 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-58-65>

Введение. Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин путем химико-термической обработки широко используется в машиностроении. При этом наиболее часто применяется цементация или азотирование. Принято считать, что при цементации стальных деталей (в частности, зубчатых колес), включая их закалку и отпуск, прочность изделий повышается в 1,7 раза, а после азотирования – в 1,3 раза [1]. Указанное различие обусловлено прежде всего разной толщиной упрочненного слоя, формируемого при цементации и азотировании, градиентами изменения твердости по упрочненному слою, а также прочностью самого слоя [2].

На основе созданной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси методологии формирования заданных свойств конструкционных сталей и деталей из них путем целенаправленного управления химическим и структурным строением приграничных объемов зерен материала [3] разработаны новые технологии и стали, применение которых позволяет решить проблему обеспечения заданной работоспособности крупногабаритных азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением, а также расширяет перспективы использования азотирования для обработки ряда деталей (мелкомодульных шестерен, шлицевых соединений) взамен их упрочнения цементацией или токами высокой частоты (ТВЧ). Детально рассмотрены эксплуатационные свойства и преимущества новой стали 40ХМФА. Показана возможность замены цементации на ионно-плазменное азотирование мелкомодульных зубчатых колес при изготовлении их из стали 40ХМФА с обеспечением заданной их прочности.

Цель настоящей работы – обобщение опыта применения известных и новых разработанных марок сталей для повышения технологичности и прочности деталей машин, упрочняемых азотированием, и определение перспективы использования этих материалов.

Повышение надежности и ресурса азотированных деталей. Основной проблемой обеспечения прочности азотированных зубчатых колес является низкая твердость сердцевины деталей, хрупкость их упрочненного слоя и малая его толщина [3]. Дополнительным фактором снижения прочности зубчатых колес (и прежде всего азотированных) выступает макролокализованная пластическая деформация (МЛПД), возникающая в подслоиных объемах деталей при циклической нагрузке. Указанные факторы приводят к разрушению слоя и выходу из строя детали при ее эксплуатации.

Повышение твердости сердцевины деталей (в том числе для устранения МЛПД) лимитируется снижением обрабатываемости материала при нарезании зубьев и их точности из-за повышенного износа режущего инструмента. Решением проблемы прочности для шестерен из часто используемой стали 38X2MЮА является разработанная специальная термообработка заготовок – так называемая «неполная закалка» [3]. Она позволяет повышать твердость сердцевины деталей до 300 HB без снижения их обрабатываемости, что при поверхностной твердости рабочих поверхностей зубьев на уровне 900–1000 HV и толщине упрочненного слоя 0,25–0,35 мм повышает износостойкость зубьев, надежность и общий ресурс деталей [3].

Принципиальное отличие нового способа улучшения сталей от «неполной закалки», возникающей вследствие нагрева деталей ниже температуры превращения феррита в аустенит (точки A_{c3} на диаграмме состояния системы «железо–углерод»), заключается в том, что микроструктура стали с ферритными включениями при новом методе закалки формируется из образовавшегося, но не полностью гомогенизированного аустенита при нагреве выше указанной температуры. Тогда как при температурах нагрева ниже A_{c3} в стали сохраняется доэвтектоидный феррит исходной структуры вследствие ее незавершенного превращения в аустенит. Недостатком такой закаленной структуры является пониженная твердость феррита, а также снижение механических свойств материала после отпуска.

В случае закалки негомогенизированного аустенита происходит непрерывное изменение механического состояния феррита вследствие увеличения твердости и прочности приграничных объемов его зерен, а также возникающего объемного напряженно-деформированного состояния (НДС) при образовании мартенсита и фазового наклепа структуры, которые приводят к возрастанию микротвердости феррита до 200–238 HV и повышению его прочности.

Теоретически это полностью согласуется с процессами превращения аустенита в надкритическом районе температур. Условия аустенизации и, соответственно, состояние аустенита оказывают большое влияние на кинетику фазовых превращений при закалке и конечные свойства образующихся при этом структур [4].

«Неполная закалка», применяемая для улучшения обрабатываемости крупногабаритных азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением, незначительно снижает предел выносливости их обода при циклическом поперечном изгибе: не более чем на 10 % в сравнении с обработкой заготовок по режиму «полной закалки». При этом азотирование повышает предел выносливости обода до 30 %, а величина предела выносливости достигает 460 МПа при поперечном изгибе. Созданный новый метод термообработки заготовок значительно упрощает технологии изготовления крупногабаритных зубчатых колес, позволяет увеличить надежность и ресурс зубчатых колес из стали 38ХМФА и используется в промышленности [5].

Особо большой конструкционной прочностью отличаются азотированные зубчатые колеса и детали, изготовленные из стали 20ХН4МФЮА (патент ВУ 9749 «Способ изготовления зубчатых колес», авторы – В. И. Моисеенко, П. И. Папковский, Н. Д. Шкатуло, С. А. Шишко, Д. И. Харитончик, П. Л. Мариев). Особенность стали 20ХН4МФЮА – твердение поверхностного слоя (до 900–950 HV) и сердцевины (40 HRC) на стадии азотирования за счет концентрации алюминия и никеля на границах зерен материала [3]. Указанный материал позволяет получать шестерни с характеристиками, превышающими конструкционные параметры цементированных зубчатых колес, в частности используемых в редукторах электромобилей NISSAN.

Изложенная выше новая методология управления свойствами сталей путем формирования структуры приграничных объемов зерен материала использована и при разработке стали 40ХМФА для особо крупных азотированных шестерен внутреннего зацепления (диаметром порядка 1000 мм) с повышенной толщиной упрочненного поверхностного слоя до 0,5–0,7 мм (см. ГОСТ 33 189-2014).

Согласно патенту РФ 2 553 764: МПК С22С 38/24 «Азотируемая сталь для зубчатых колес» (авторы – В. И. Моисеенко, А. Л. Сапунов, Н. Д. Шкатуло) и ТУ 1-806-1184-2013 «Кольца цельнокатаные, кольца цельнокатаные точные, поковки и штамповки из стали марки 40ХМФА» химический состав разработанной стали соответствует особым требованиям в части содержания ванадия, молибдена и хрома.

Легирование стали молибденом (0,2–0,3 %) и модифицирование ее ванадием (0,05–0,08 %) при содержании хрома в достаточно узком диапазоне (1,1–1,2 %) позволяет обеспечивать предельно высокий уровень технологических и прочностных свойств азотируемых деталей. Верхние пределы содержания в стали молибдена и ванадия предотвращают появление интерметаллидных фаз, ухудшающих механическую обработку, особенно нарезание зубьев крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением.

Обрабатываемость деталей проверялась по мощности, потребляемой при нарезании зубьев, износу режущего инструмента, точности поверхности обработанных зубьев. Установлено, что с увеличением твердости мощность при обработке стали 40ХМФА возрастает, но при одинаковой

твердости (280 НВ) потребляемая мощность на стали 40ХМФА на 20–25 % ниже, чем на стали 38Х2МЮА.

Впервые предложено вводить ванадий в материал азотируемых деталей с целью устранения в стали при циклической нагрузке МЛПД, ускоряющей разрушение азотированного слоя и всей детали [6]. Наличие в материале ванадия в указанных количествах позволяет устранять МЛПД в подслоях объемах азотированных деталей, свидетельством чему является отсутствие площадки текучести на диаграммах растяжения образцов из нового материала (рис. 1). Установлено, что МЛПД при циклической нагрузке развивается только в сталях, на диаграммах растяжения которых проявляется площадка текучести [6].

Сталь 40ХМФА имеет более высокие характеристики пластичности, чем у известных сталей 38Х2МЮА и 38ХМ (таблица), что является дополнительным фактором повышения прочности при работе деталей при низких температурах и ударно-вибрационных эксплуатационных нагрузках.

Зубчатые колеса из стали 40ХМФА и образцы материала для лабораторных исследований из указанных в таблице сталей подвергались ионному азотированию на установке PLATEC-PP 200/60 и газовому азотированию в шахтной печи США 8.12/6.

Поверхностную твердость образцов фиксировали на приборе ИТ5010 при нагрузке 5 кг.

Толщину азотированного слоя (от поверхности до структуры сердцевины) и распределение твердости по его толщине азотированного слоя определяли измерителем микротвердости Leica VMHTMOT при нагрузке 100 г согласно РД Республики Беларусь 02.260.17.40 от 20.01.2003 (рис. 2, 3).

Установлено, что твердость азотированной поверхности деталей из стали 40ХМФА оказалась ниже по сравнению со сталью 38Х2МЮА, однако кривая распределения твердости по толщине азотированного слоя, начиная с 0,09 мм (что соизмеримо с величиной приработки поверхности зубьев), располагается выше, чем у алюминийсодержащей стали 38Х2МЮА (рис. 2).

При этом микротвердость азотированной поверхности образцов из стали 40ХМФА составляет 645–765 НВ, толщина слоя, определяемая как расстояние от поверхности до структуры сердцевины, – 0,6–0,7 мм.

Увеличение толщины упрочненного слоя достигается устранением концентрации алюминия и его соединений на границах зерен стали [3]. Отличительной особенностью стали 40ХМФА является отсутствие хрупких составляющих в слое. Градиент изменения твердости по толщине слоя (от поверхности к сердцевине) у стали 40ХМФА значительно меньше, чем у стали 38Х2МЮА (см. рис. 2). Значения микротвердости азотированного слоя по профилю зубьев не имеют различий (см. рис. 3).

В азотируемых сталях без алюминия твердость диффузионного азотированного слоя зависит от исходной твердости сердцевины: чем выше твердость сердцевины, тем больше твердость азотированного слоя по всей толщине. При твердости поверхности азотированных деталей из стали

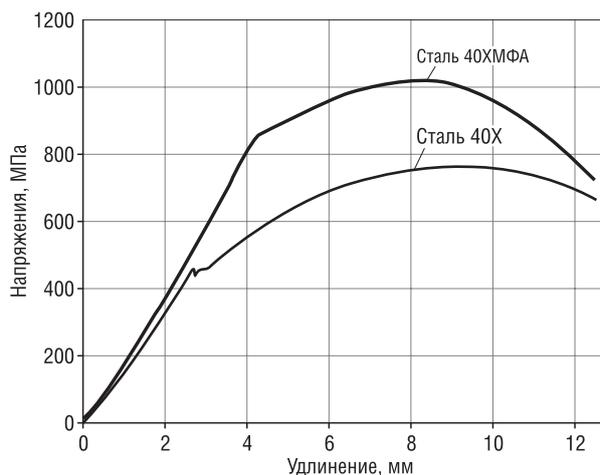


Рис. 1. Общий вид кривых растяжения на пределе текучести образцов из стали 40ХМФА и стали 40Х после термообработки: нормализация 860 °С + отпуск 580 °С, в течение 2 ч

Fig. 1. General view of the tensile curves at the yield point of samples of steel 40ХМФА and steel 40Х after heat treatment: normalization at 860 °С + tempering at 580 °С, within 2 h

Механические характеристики образцов из сталей 38Х2МЮА, 38ХМ и 40ХМФА

Mechanical characteristics of samples made of steels 38Х2МЮА, 38ХМ and 40ХМФА

Марка стали	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	δ , %	ψ , %	Твердость, НВ	КСУ, Дж/см ²
38Х2МЮА, ГОСТ 4543-71	980	835	14	50	255-302	88
38ХМ, ГОСТ 4543-71	980	885	11	45	255	69
40ХМФА	970	840	20	64	285	140

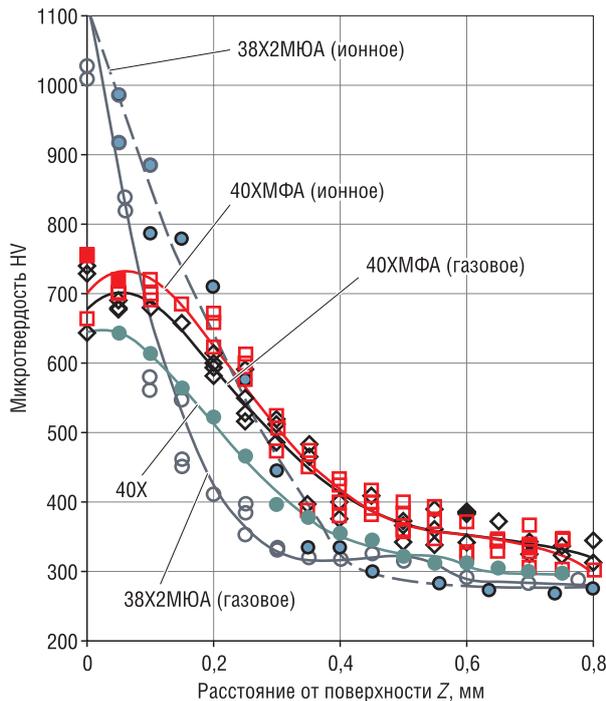


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя образцов из сталей 40ХМФА, 38Х2МЮА после ионного и газового азотирования и 40Х после газового азотирования

Fig. 2. Distribution of microhardness over the thickness of the nitrided layer of samples made of steels 40ХМФА, 38Х2МЮА after ion and gas nitriding and 40Х after gas nitriding

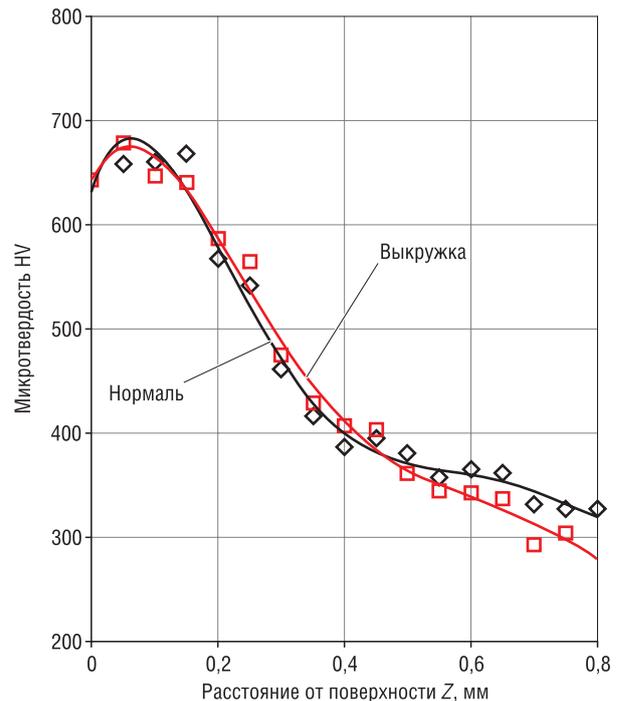


Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя по нормали к делительной окружности и в выкружке у ножки зуба детали 75132-2405284 из стали 40ХМФА

Fig. 3. Distribution of microhardness over the thickness of the nitrided layer along the normal to the pitch circle and in the fillet at the tooth foot of part 75132-2405284 made of 40ХМФА steel

40ХМФА 650–750 HV глубина слоя достигает до 0,7 мм. Предел выносливости при стендовых испытаниях фрагментов ободьев колес из стали 40ХМФА равен 520 МПа. Точность полученных из стали 40ХМФА зубчатых колес соответствует повышенным требованиям чертежа и при твердости колес 285–302 НВ может достигать 6-й степени точности [5].

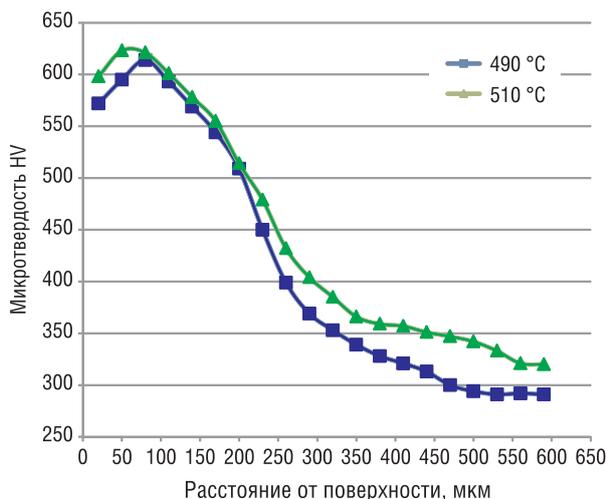


Рис. 4. Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя образцов из стали 40ХМФА при различных температурах ионно-плазменного азотирования

Fig. 4. Distribution of microhardness over the thickness of the diffusion layer of 40ХМФА steel samples at different temperatures of ion-plasma nitriding

Повышенная жаростойкость стали 40ХМФА позволяет азотировать детали при более высоких температурах без снижения твердости, сформированной до азотирования. Экспериментальные данные подтверждают, что увеличение температуры обработки положительно влияет на распределение микротвердости по толщине азотированного слоя и при ионно-плазменном азотировании (рис. 4).

Проведенные исследования показали, что новая сталь в ряде случаев позволяет заменить технологию упрочнения деталей цементацией на их ионное азотирование. Такого рода исследования были выполнены на ОАО «Белорусский автомобильный завод» (ОАО «БЕЛАЗ») при получении мелкозубчатых шестерен ($m < 6$ мм) и деталей шлицевых соединений путем их изготовления из стали 40ХМФА с последующим ионно-плазменным

азотированием вместо серийно применяемых сталей 20ХН3А после цементации и стали 45, обработанной токами высокой частоты (ТВЧ) (рис. 5).

Также были проведены сравнительные стендовые испытания мелко модульных шестерен ($m = 4$), изготовленных из сталей 40ХМФА и 20ХН3А (соответственно после ионного азотирования и цементации). Исследования осуществлялись на стенде испытаний шестерен с замкнутым силовым контуром, состоящим из двух редукторов, соединенных карданной муфтой.

В одном из редукторов испытывались четыре шестерни из стали 40ХМФА, упрочненные азотированием, в другом – из стали 20ХН3А, упрочненные цементацией. Режим испытаний: $M = 300\text{--}700 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $n = 700\text{--}900 \text{ об/мин}$, время испытаний 400 ч.

Испытания показали, что на всех шестернях следов разрушения или повреждения зубьев не обнаружено. Аналогичные результаты получены и в эксплуатации при замене цементации азотированием шестерен привода масляного насоса самосвала БЕЛАЗ (рис. 6). Таким образом, показано, что мелко модульные азотированные зубчатые колеса из стали 40ХМФА способны воспринимать циклические нагрузки наряду с цементированными из стали 20ХН3А.

Дополнительно в соответствии с ГОСТ 21354-87 был выполнен прочностной расчет мелко модульной зубчатой передачи редуктора привода насоса БЕЛАЗ (рис. 6), где одно зубчатое колесо было цементированное, а другое – азотированное. Нагрузочный режим зубчатой передачи: 90 % работы при $M = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $n = 2100 \text{ об/мин}$.

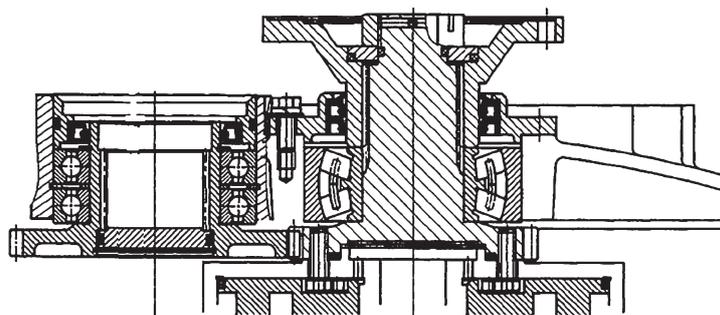


Рис. 6. Общий вид мелко модульной зубчатой передачи редуктора привода насоса гидромеханической трансмиссии БЕЛАЗ

Fig. 6. General view of the fine-modular gear transmission of the BELAZ hydromechanical transmission pump drive reducer

При сопоставлении расчетного и допускаемого напряжений установлено:

по критерию контактной прочности:

$$\sigma_H = 595 \text{ МПа} < \sigma_{HP} = 749 \text{ МПа.}$$

по изгибу:

$$\sigma_{F1} = 174 \text{ МПа} < \sigma_{FP1} = 675 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{F2} = 230 \text{ МПа} < \sigma_{FP2} = 606 \text{ МПа.}$$

Следовательно, при изгибе и контактной прочности выносливость обоих типов зубьев обеспечивается.

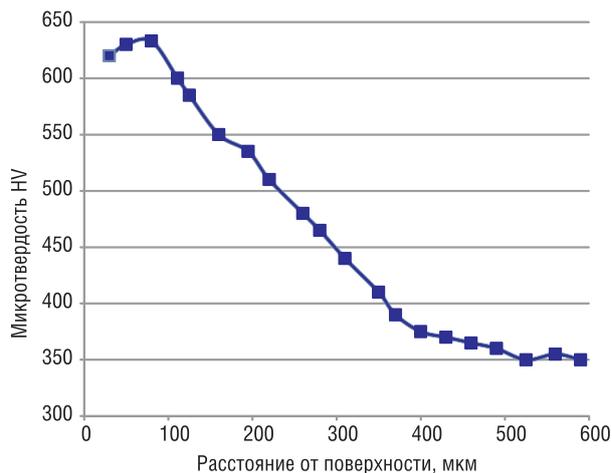


Рис. 5. Кривая распределения микротвердости по азотированному слою ступицы фрикциона из стали 40ХМФА планетарной коробки переключения передач БЕЛАЗ, обработанной по режиму ионно-плазменного упрочнения
Fig. 5. Curve of microhardness distribution over the nitrided layer of the friction clutch hub made of 40ХМФА steel of the BELAZ planetary gearbox, treated according to the ion-plasma hardening mode

Кроме определения контактной и изгибной выносливости был выполнен расчет на предотвращение глубинного контактного разрушения по приложению 8 ГОСТ 21 354-87. Данный расчет также выявил, что предел глубинной контактной выносливости не только не превышает расчетное контактное напряжение, но и превосходит его более чем в 2 раза:

$$\sigma_H = 595 \text{ МПа} \leq \frac{\sigma_{HPK}}{S_{HK}} = 1459,6 \text{ МПа.}$$

Таким образом, расчетные результаты показывают возможность замены в реальных конструкциях цементации зубьев шестерен на их азотирование без опасности усталостного разрушения

Приведенные результаты дополнительно подтверждены данными эксплуатационных испытаний. В настоящее время новая конструкционная азотируемая сталь 40ХМФА используется в серийном производстве ОАО «БЕЛАЗ» для изготовления коронных шестерен редукторов карьерных самосвалов. В соответствии с ТУ 1-806-1184-2013 ее производство освоено в Российской Федерации и Европейском союзе.

Следует упомянуть и экономический аспект использования ионного азотирования взамен цементации: если процесс цементации шестерен проводится при температуре 930 °С, то их ионное азотирование из стали 40ХМФА – при температуре 510 °С. Снижается и трудоемкость изготовления деталей из-за уменьшения количества технологических операций: в частности, исключается процесс шлифования зубьев, который требуется после цементации и который не всегда выполним (например, для блоков шестерен).

Перспективным может быть дальнейшее расширение использования сталей 20ХН4МФЮ и 40ХМФА, а также технологий производства деталей из них в серийном производстве ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Минский автомобильный завод», ОАО «Гомсельмаш». Целесообразным представляется и изготовление из этих сталей высокоточных шестерен для редукторов легковых электромобилей, а также освоение проката указанных материалов в производстве ОАО «БМЗ», в том числе для экспорта.

Заключение. Впервые разработанная в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси методология формирования заданных свойств конструкционных сталей путем целенаправленного управления химическим и структурным строением приграничных объемов зерен материала позволила создать новые стали и технологии получения азотированных шестерен широкого применения. В их числе – высокоточные (модуль менее 4 мм) и крупногабаритные (модуль свыше 10 мм, диаметр свыше 1000 мм) с повышенной толщиной и прочностью упрочненного слоя (0,5–0,7 мм). Это дает возможность в перспективе обеспечивать ресурс зубчатых колес в жизненном цикле машин широкого назначения: от легковых электромобилей до карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности, а также судовых конструкций и технологического оборудования большой единичной мощности.

Использование новых материалов и технологий в производстве карьерных самосвалов позволило не только устранить аварийность их редукторных систем по причине выхода из строя азотированных шестерен, но и сократить почти в 10 раз потребность в запасных частях этих деталей, что заметно повысило конкурентоспособность продукции БЕЛАЗ. При этом снижены стоимость, трудоемкость и энергоемкость производства, повышена его экологичность. Освоение новых материалов в металлургии (Белорусский металлургический завод) и создание производства высокоточных азотированных зубчатых колес в машиностроении открывает новые возможности импортозамещения и экспорта предприятий Беларуси в современных условиях развития электромобилей.

Список использованных источников

1. Справочник металлста / под ред. С. А. Чернавского, В. Ф. Решетникова. – М.: Машиностроение, 1976. – Т. 1. – 768 с.
2. Терентьев, Е. Ф. Использование азотирования для изменения механических характеристик металлических материалов / Е. Ф. Терентьев, А. Г. Колмаков, М. С. Мичугина // I Междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов»: сб. материалов / ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН. – М., 2006. – С. 457–463.
3. Харитончик, Д. И. Крупногабаритные зубчатые колеса с внутренним зацеплением из алюминийсодержащих сталей / Д. И. Харитончик, В. И. Моисеенко. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 125 с.

4. Гуляев, А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 543 с.
5. Харитончик, Д. И. Конструкционная прочность алюминийсодержащих сталей в крупногабаритных азотированных зубчатых колесах с внутренним зацеплением / Д. И. Харитончик // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2012. – № 1. – С. 71–75.
6. Моисеенко, В. И. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин / В. И. Моисеенко, П. Л. Мариев. – Минск: Ин-т кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 200 с.

References

1. Chernavskii S. A., Reshetnikov V. F. (eds.) *Metalworker's Handbook. Volume I*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 768 p. (in Russian).
2. Terent'ev E. F., Kolmakov A. G., Michugina M. S. Using nitriding to change the mechanical properties of metallic materials. *I Mezhdunarodnaya konferentsiya "Deformatsiya i razrushenie materialov": sbornik materialov* [I International Conference "Deformation and Fracture of Materials": Collection of Materials]. Moscow, Institute of Metallurgy and Materials Science them. A. A. Baykov RAS, 2006, pp. 457–463 (in Russian).
3. Kharitonchik, D. I., Moiseenko V. I. *Oversized Internal Gears Made of Aluminum-Containing Steels*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 125 p. (in Russian).
4. Gulyaev A. P. *Metallurgical Engineering*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 543 p. (in Russian).
5. Kharitonchik, D. I. Structural strength of aluminum-containing steels in large-size nitrided gears with internal gearing. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2012, no. 1, pp. 71–75 (in Russian).
6. Moiseenko V. I., Mariev P. L. *Fundamentals of Structural Uniform Strength of Steel and Elements of Large-Sized Machine Parts*. Minsk, Institute of Cybernetics of the National Academy of Science of Belarus, 1999. 200 p. (in Russian).

Информация об авторах

Витязь Петр Александрович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель аппарата Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Моисеенко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vim38@tut.by

Сидоренко Александр Георгиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ks_oim@tut.by

Сотников Максим Владимирович – младший научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ks_oim@tut.by

Шкатуло Наталья Дмитриевна – научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ks_oim@tut.by

Харитончик Дмитрий Иванович – заместитель министра промышленности Республики Беларусь, Министерство промышленности Республики Беларусь (Партизанский пр., 2, корп. 4, 220033, Минск, Республика Беларусь). E-mail: minprom4@minprom.gov.by

Information about the authors

Pyotr A. Vityaz – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Academy Staff of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Vladimir I. Moiseenko – D. Sc. (Engineering), Professor, Head Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vim38@tut.by

Aleksandr G. Sidorenko – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ks_oim@tut.by

Maksim V. Sotnikov – Junior Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ks_oim@tut.by

Natalia D. Shkatulo – Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ks_oim@tut.by

Dmitry I. Haritonchik – Deputy Minister of Industry of the Republic of Belarus, Ministry of Industry of the Republic of Belarus (2, building 4, Partizansky Ave., 220033, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: minprom4@minprom.gov.by