



# МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.833, 621.785.53

**П.А. ВИТЯЗЬ**, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.  
руководитель аппарата НАН Беларуси<sup>1</sup>  
E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

**М.В. СОТНИКОВ**

младший научный сотрудник лаборатории проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности<sup>2</sup>  
E-mail: ks\_oim@tut.by

**А.Г. СИДОРЕНКО**, канд. техн. наук

заведующий лабораторией проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности<sup>2</sup>  
E-mail: ks\_oim@tut.by

**В.И. МОЙСЕЕНКО**, д-р техн. наук, проф.

главный научный сотрудник лаборатории проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности<sup>2</sup>  
E-mail: ks\_oim@tut.by

**С.А. ШИШКО**

заместитель главного конструктора<sup>3</sup>  
E-mail: kbst@belaz.minsk.by

<sup>1</sup>Президиум НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 12.07.2021.

## НОВЫЕ СТАЛИ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АЗОТИРУЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОВЫШЕННОГО РЕСУРСА

*Проведен анализ применяемых сталей для азотированных деталей. На основе новой методологии повышения прочности конструкционных сталей и деталей предложены и рассмотрены новые научные подходы и практические решения по созданию зубчатых колес, упрочняемых азотированием как при использовании алюминийсодержащих сталей, так и нового материала, не содержащего алюминий, — 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 их прочности из-за устранения шеттушения азотированного слоя. Приведены результаты исследований по стали 40ХМФА, которая не содержит алюминий, обладает повышенными характеристиками жаростойкости, прокаливаемости, обрабатываемости, а также упрочненного слоя деталей. Азотированный слой шестерен толщиной 0,5–0,7 мм не содержит хрупких составляющих, что при твердости сердцевины 300–320 НВ исключает его шеттушение и последующее разрушение деталей. Применение стали 40ХМФА позволяет не только решать проблемы надежности и ресурса крупногабаритных азотированных зубчатых колес, но и является перспективным для всего ряда зубчатых колес с внутренним зацеплением, а также деталей подвижных шлицевых зацеплений и мелкозубчатых шестерен с целью замены цементации азотированием.*

**Ключевые слова:** азотирование, микротвердость, азотированный слой, механические характеристики

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-42-51>

Процесс повышения поверхностной твердости стали путем азотирования впервые был введен в практику в Германии в 20-х гг. XX в. Азотирование сегодня применяется для упрочнения разнообразных сталей: конструкционных, инструментальных, жаропрочных, коррозионностойких.

Твердость слоя при азотировании чистого железа невелика, поэтому на практике азотированию подвергаются легированные стали. Легирующие элементы в процессе насыщения азотом образуют специальные нитриды, что изменяет состав фаз и температурные границы их образования. Наиболее широкое распространение получили стали, легированные, в первую очередь, алюминием до 2 %. В результате исследований стойкости нитридов, образуемых различными элементами, добавляемыми в сталь, было установлено, что алюминий образует наиболее стойкие нитриды, позволяющие получать твердость на уровне 1000 HV и обеспечивать высокую износостойкость контактирующих поверхностей. Установлено и повышение усталостной прочности азотированных деталей. Важным фактором при азотировании является отсутствие в большинстве случаев необходимости в дополнительной финишной обработке (шлифовании) упрочненных поверхностей деталей.

Все это способствовало развитию процесса азотирования стали и расширению применения алюминия в азотируемых сталях. К середине XX в. только в США производство азотированной стали составило примерно 100 000 тонн в год [1].

В настоящее время номенклатура азотируемых сталей достаточно обширна и позволяет находить решения проблемных задач обеспечения работоспособности изделий при минимизации затрат на их изготовление (таблицы 1, 2).

Некоторые стали, содержащие алюминий, дополнительно легируются никелем до 5 % [1, 4]. Азотируемые стали, содержащие никель в указанных количествах и применяемые в основном на дальнем зарубежье, используются в тех случаях, когда требуется особо высокая твердость сердцевины и обеспечение повышения вязкости азотированного слоя. Обычно термическая обработка сталей этого типа заключается в закалке с 900 °С и отпуске при 650 °С. В результате обеспечивается твердость около 280 HV, с целью возможности обрабатываемости детали, но при последующем азотировании сердцевина подвергается дисперсионному твердению вследствие образования в материале никель-алюминиевых соединений. Это приводит к заметному повышению ее твердости и прочности [4].

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси создан и всесторонне исследован более экономичный аналог материала, твердеющего при азотировании (с более низким содержанием никеля) — сталь 20ХН4МФЮА, которая рекомендована и для замены цементации азотиро-

ванием для маломодульных зубчатых колес, в том числе электроавтомобилей [4].

Несмотря на многочисленные исследования природы и технологий азотирования и имеющийся широкий спектр азотируемых сталей, а также на существование методических рекомендаций и нормативных указаний по оценке прочности азотированных колес, сегодня нет практических данных и примеров промышленного решения существенного увеличения несущей способности крупногабаритных азотированных зубчатых колес, особенно колес с внутренним зацеплением, позволяющих по техническим и экономическим характеристикам стать альтернативой цементированным колесам редукторных систем машин и других транспортных средств большой единичной мощности и грузоподъемности [4].

Исследования работоспособности крупногабаритных азотированных колес, изготовленных из разных сталей (в том числе для карьерных самосвалов различных модификаций), свидетельствуют, что основные недостатки деталей в эксплуатации и при их изготовлении сводятся к следующему:

- отслаивание (шелушение) упрочненного слоя, обусловленное его хрупкостью, недостаточной прочностью сердцевины детали и развитием в ее материале специфического дефекта: макролокализованной (сосредоточенной) пластической деформации (МЛПД), ускоряющей разрушение слоя;
- усталостное разрушение ободьев зубчатых колес внутреннего зацепления мобильных машин, для которых весовые характеристики и габариты агрегатов приобретают решающее значение;
- высокие контактные и изгибные нагрузки, вызванные неточностью изготовления деталей из-за низкой обрабатываемости используемых материалов по причине образования твердых соединений в приграничных объемах зерен, вызывающих повышенный износ режущего инструмента без возможности его замены в процессе обработки. Отмеченное явление наиболее характерно для колес с большим числом зубьев, увеличенной длиной венца и крупным модулем, что предполагает удаление большого объема металла и приводит к интенсивному износу инструмента.

В результате проведенных исследований установлена крайне неравномерная концентрация на границах зерен примесных и легирующих элементов для большинства конструкционных сталей. При общем содержании (например, меди, никеля или ванадия, каждого более 0,10 %) их концентрация в приграничных объемах зерен заметно больше и крайне неравномерна, например, концентрация никеля у никельсодержащих сталей может достигать 20 % [5], что приводит к структурной неоднородности зерен материала, снижению его прочности. Установлено также, что и высокая хрупкость азотированного слоя стали 38Х2МЮА связана с увеличением концентрации легирующих

Таблица 1 — Марки азотируемых сталей, используемых на территории бывшего СССР, режимы их обработки и характеристики упрочненного слоя [2]

Table 1 — Grades of nitrided steels used on the territory of the former USSR, their processing modes and characteristics of the hardened layer [2]

Марка стали	Температура, °С	Выдержка, ч	Толщина слоя, мм	Твердость азотированного слоя, НВ
Конструкционные стали				
38Х2МЮА	500–520	48–60	0,40–0,50	1000–1100
	540	40	0,5–0,6	900–1000
	510 (для 1-й ступени) 550 (для 2-й ступени)	15 25	0,5–0,6	850–1000
38ХВФЮА 18Х2Н4ВА 40ХНМА	510	24–48	0,30–0,40	850–950
	490–510	40–50	0,35–0,40	750–850
	510 (для 1-й ступени) 540 (для 2-й ступени)	25 35	0,5–0,6	~600
30Х3МФ1С 25Х2Н2МФ 25Х3Н3МФ 30Х2Н2В2	560	24	0,5	900–950
	560	25	0,4	850
	575	25	0,5	750
	510 (для 1-й ступени)	25	0,5–0,6	~750
	540 (для 2-й ступени)	35		
40ХНМА 40ХНВА 30Х2Н2ВА 30Х2Н2ВФА 30Х2Н2ВФМА	500–520	50–60	0,5–0,6	≥640
				≥700
				≥700
				≥700
				≥700
40ХНВА 30Х2НВА 30Х2Н2ВФА 30Х2Н2ВФМА 30Х3ВА	510 (для 1-й ступени) 540 (для 2-й ступени)	25 30	0,6–0,7	≥640
				≥700
				≥700
	500–525	60–80	0,35–0,55	≥700
				750–800
Ферритные, аустенитные, мартенситностареющие стали				
12Х13	500	48	0,14–0,16	1000–1050
	550		0,25–0,30	900–950
	600		0,35–0,40	800–850
20Х13	500	48	0,10–0,12	1000–1050
	550		0,25–0,30	900–950
	600		0,30–0,40	780–830
15Х11МФ 15Х12ВМФ	530 (для 1-й ступени)	10	0,35–0,40	900–950
	580 (для 2-й ступени)	20		
45Х14Н14В2М	560	60	0,10–0,12	800–900
	600	48	0,10–0,12	750–800
25Х18Н8В2	560	24	0,12–0,14	950–1100
	560	40	0,16–0,20	900–950
	600	24	0,12–0,16	900–950
17Х18Н9	560	50–60	0,20–0,25	1000–1400
40Х14Н9Х3ЮФ2	560–600	48	0,20–0,30	1300–1400
Инструментальные стали				
Р9, Р18 Х12М, Х12Ф1 3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС и др.	510–520	0,25–1,0	0,01–0,025	1340–1460
	510–520	8–12	0,08–0,12	1100–1200
	530–540	12–16	0,2–0,25	1100

элементов на границах бывших аустенитных зерен и, как следствие, увеличением количества нитридных выделений [4]. В то же время учет этих явлений и возможность управления ими открывают, по нашему мнению, более широкие возможности повышения служебных свойств деталей: конструкционных и технологических [4].

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 разработаны новые технологии и стали, применение которых позволило решить проблему обеспечения требуемой работоспособности крупногабаритных азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением, а также расширить

Таблица 2 — Состав и твердость азотируемых сталей с высокой прочностью сердцевины [3]  
Table 2 — Composition and hardness of nitrided steels with high core strength [3]

Химический состав, %								Температура азотирования, °С	Время азотирования, ч	Твердость поверхности, НВ	Твердость сердцевины, HRC
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W				
0,53	0,3	0,34	3,65	0,51	—	0,74	—	525	72	975	47
1,50	0,3	—	12,11	0,94	—	0,94	—	540	48	1150	59
1,33	0,3	0,28	13,31	0,81	0,55	—	—	540	72	970	50
0,77	0,3	0,24	3,83	8,63	—	0,01	1,35	540	72	1400	63
1,2–1,3	0,3	—	1,00–1,25	—	—	0,15–0,25	4,75–5,25	540	48	925	56
1,04	0,3	—	1,25	1,33	—	0,25	0,51	540	48	975	47

Примечание. В стали, содержащей C = 1,33 % и Ni = 0,55 % (строка 3), дополнительно имеется 3,8 % Co.

перспективы использования азотирования для обработки ряда деталей.

Решением проблемы обеспечения прочности для шестерен из часто используемой стали 38Х2МЮА является разработанная специальная термообработка заготовок, так называемая неполная закалка [4]. Она позволяет повышать твердость сердцевины деталей до 250–300 НВ при приемлемой их обрабатываемости, что при поверхностной твердости рабочих поверхностей зубьев на уровне 900–1000 НВ и толщине упрочненного слоя 0,25–0,35 мм существенно повышает износостойкость зубьев, надежность и общий ресурс деталей [4].

Цель созданной технологии — формирование в материале структур с наименьшим сопротивлением пластической деформации, позволяющей реализовать общие принципы механики разрушения конструкционных сталей и главное положение механики резания металлов: более 90 % энергии резания приходится на процесс макролокализованного пластического течения материала, определяемого дислокационными явлениями в стали [4].

При этом приоритетное внимание уделено зернограницным эффектам концентрации и взаимодействия элементов в феррите повышенной прочности — явлению, которое способствует зарождению и движению дислокаций в стали, в ее зернах, обеспечивая минимум затрат на резание.

Формирование такой структуры происходит при закалке неомогенного аустенита — структуры формирующейся в стали при ее нагреве выше температуры превращения феррита в аустенит (точки  $A_{c3}$  на диаграмме состояния железо-углерод). Принципиальное отличие нового способа улучшения сталей от неполной закалки, возникающей вследствие нагрева деталей ниже температуры превращения феррита в аустенит, 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 ухудшение механических свойств материала после отпуска [4].

После закалки неомогенного аустенита конструкционных сталей, характеризующегося различной локальной концентрацией элементов (как углерода, так и металлических легирующих), при охлаждении в масле закаленная микроструктура может содержать различные продукты превращения неоднородного переохлажденного аустенита: мартенсита, сорбита, троостита, сорбитообразного перлита и феррита. При этом происходит непрерывное изменение механического состояния феррита вследствие увеличения твердости и прочности приграничных объемов его зерен, а также возникающего объемного напряженно-деформированного состояния при образовании мартенсита и фазового наклепа структуры, которые приводят к возрастанию микротвердости феррита до 200–238 НВ и повышению его прочности.

Неполная закалка, применяемая для улучшения обрабатываемости крупногабаритных азотированных зубчатых колес внутреннего зацепления, 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 предел выносливости обода повышается до 30 %, а величина предела выносливости детали при поперечном циклическом изгибе достигает 460 МПа. Созданный новый метод термообработки значительно упрощает технологию изготовления крупногабаритных зубчатых колес, позволяет увеличить их надежность и ресурс, что нашло применение в производстве, в первую очередь, для деталей с повышенными требованиями по износостойкости [5].

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 толщиной упрочненного поверхностного слоя до 0,5–0,7 мм.

Согласно патенту [6] 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 внутреннего зацепления.

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 для стали 40ХМФА на 20–25 % ниже, чем для стали 38Х2МЮА.

Впервые предложено вводить ванадий в материал азотируемых деталей с целью устранения в стали при циклической нагрузке МЛПД, ускоряющей разрушение азотированного слоя (рисунок 1).

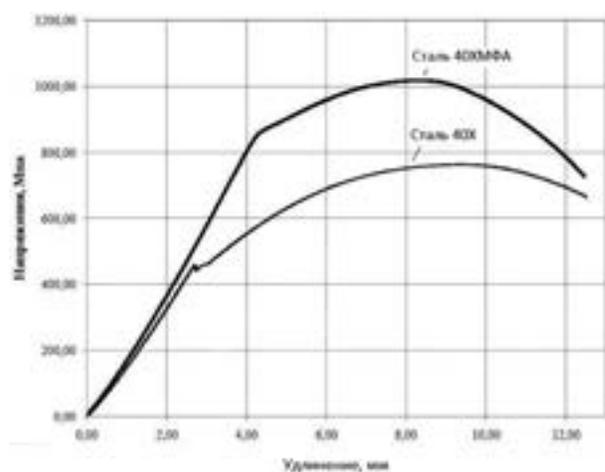


Рисунок 1 — Общий вид кривых растяжения на пределе текучести образцов из стали 40ХМФА и стали 40Х после термообработки: нормализация 860 °С + отпуск 580 °С, в течение 2 ч

Figure 1 — General view of the tensile curves at the yield strength of samples made of 40ХМФА (40KhMFА) steel and 40Х (40Kh) steel after heat treatment: normalization of 860 °С + tempering of 580 °С, for 2 hours

Сталь 40ХМФА имеет более высокие характеристики пластичности, чем у известных сталей 38Х2МЮА и 38ХМ, что является дополнительным фактором повышения прочности при работе деталей при низких температурах и ударно-вибрационных нагрузках (таблица 3).

Зубчатые колеса из стали 40ХМФА и образцы для лабораторных исследований из указанных выше сталей подвергались ионному азотированию на установке PLATEC-PP 200/60 и газовому азотированию в шахтной печи США 8.1216.

Поверхностную твердость определяли на приборе ИТ5010 при нагрузке 5 кг. Распределение твердости по толщине азотированного слоя измеряли на микротвердомере Leica VMHT MOT при нагрузке 100 г. Толщину слоя определяли до структуры сердцевины, а также по кривым распределения микротвердости по толщине слоя как расстояние от поверхности до твердости сердцевины (рисунки 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 (см. рисунок 2).

При этом микротвердость азотированной поверхности образцов из стали 40ХМФА составля-

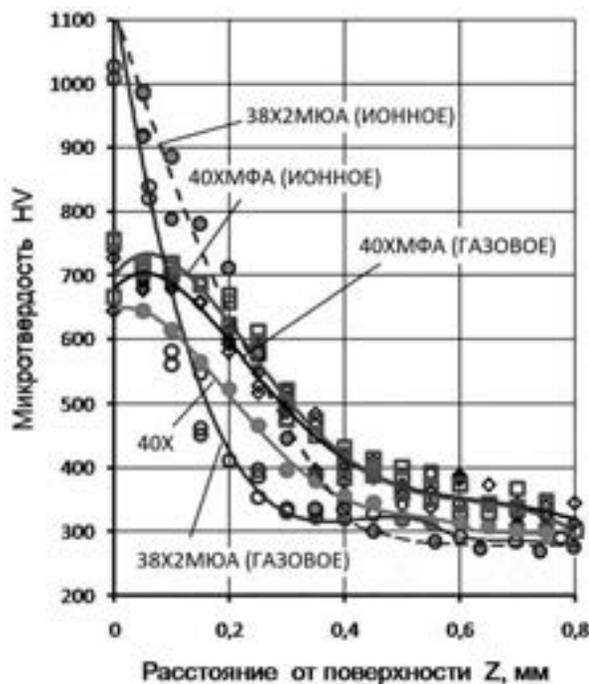


Рисунок 2 — Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя образцов из сталей 40ХМФА, 38Х2МЮА после ионного и газового азотирования и 40Х после газового азотирования

Figure 2 — Distribution of microhardness over the thickness of the nitrided layer of samples made of 40ХМФА (40KhMFА), 38Х2МЮА (38Kh2MЮА) steels after ion and gas nitriding and 40Х (40Kh) steel after gas nitriding

Таблица 3 — Механические характеристики образцов сталей 38Х2МЮА, 38ХМ и 40ХМФА  
 Table 3 — Mechanical characteristics of 38Х2МЮА (38Kh2MYuA), 38ХМ (38KhM) and 40ХМФА (40KhMFA) steel samples

Марка стали	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Твердость, НВ	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
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

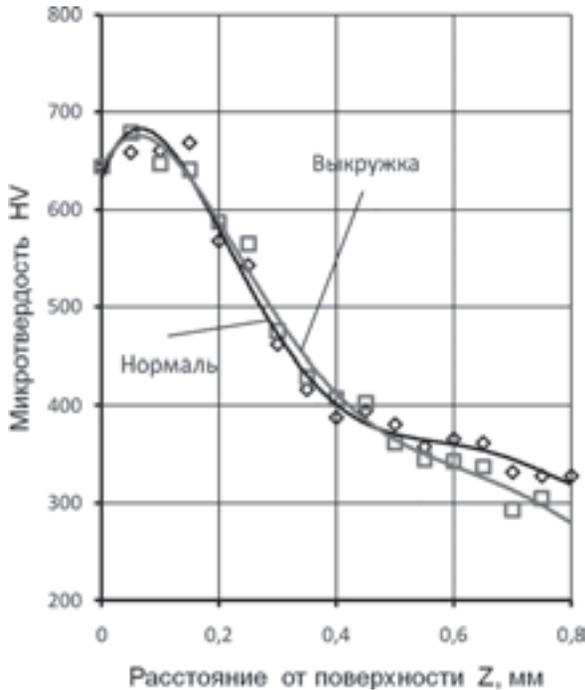


Рисунок 3 — Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя по нормали к делительной окружности и в выкружке у ножки зуба детали 75132-2405284 из стали 40ХМФА

Figure 3 — Distribution of microhardness over the thickness of the nitrided layer along the normal to the dividing circle and in the chip at the tooth fillet of the part 75132-2405284 made of 40ХМФА (40KhMFA) steel

ет 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 [4]. Отличительной особенностью стали 40ХМФА является отсутствие хрупких составляющих в слое, характерных для алюминийсодержащих сталей.

Значения микротвердости, полученные на образцах-свидетелях, подтверждаются результатами исследования на деталях из стали 40ХМФА (см. рисунок 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 40ХМФА 650–750 НВ глубина слоя достигает до 0,7 мм. Предел выносливости при стендовых испытаниях фрагментов ободьев колес из стали

40ХМФА равен 520 МПа [7]. Точность полученных из стали 40ХМФА зубчатых колес соответствует повышенным требованиям чертежа и при твердости колес 285–302 НВ может достигать 6-й степени [8].

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 (рисунок 4). Как указывалось, твердость азотированного слоя нового материала зависит от твердости заготовки. Некоторое снижение твердости тонкого поверхностного слоя, устраняемого на стадии приработки деталей — результат обезуглероживания поверхности при технологических переделах.

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 «БЕЛАЗ» при получении мелкомодульных 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) [9].

Новая концепция управления свойствами сталей путем управления строением и прочностью приграничных объемов зерен материала используется для создания сталей и деталей из них, имеющих в своем составе никель и алюминий

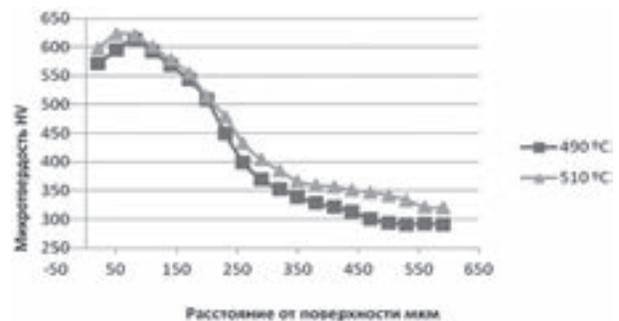


Рисунок 4 — Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя образцов из стали 40ХМФА при различных температурах ионно-плазменного азотирования  
 Figure 4 — Distribution of microhardness over the thickness of the diffusion layer of samples made of 40ХМФА (40KhMFA) steel at different temperatures of ion-plasma nitriding

и твердеющих при температурах азотирования и при повторном нагреве за счет концентрации и взаимодействия никеля и алюминия у границ зерен [4]. Основные закономерности концентрации и взаимодействия никеля, алюминия, меди в зернограницных объемах, выявленные на сканирующем микроскопе (CamScan Series 4), дополнены результатами, полученными при исследованиях тех же материалов на растровом электронном микроскопе Cambridge Instruments Stereoscan-360 со встроенным энергетическим спектрометром AN 10000 Link Analytical. Принципиальных отличий в строении границ не отмечено.

Ресурсы прочности при целевом формировании структуры приграничных объемов зерен определяются устранением или снижением локализации (концентрации) пластической деформации. Поэтому при упрочнении сталей за счет отмеченного явления особое значение приобретает дисперсность и структурная однородность образовавшихся выделений у границ зерен, так как локализация пластической деформации (ПД) у границ зерен предопределяет конструкционную прочность нагруженного объема материала детали [5].

В образце с литой структурой границы зерен четко обозначены и оторочены цепочкой светлых продолговатых включений толщиной 1,2 мкм, что составляет десятки процентов от условного диаметра зерна (рисунок 5).

Химический состав приграничных объемов зерен по содержанию никеля и алюминия заметно (в 2–3 раза) отличается от состава центра зерна. Ударная вязкость материала при указанном строении приграничных объемов зерен невысока и не превышает 15–20 Дж/см<sup>2</sup>.

Деформированный металл, прошедший такую же термообработку, как и литой металл, не имеет сплошных выделений по границам зерен. Границы зерен тонкие и не имеют четких очертаний, фазы

рассредоточены (рисунок 6). Разница в концентрации никеля и алюминия в центре зерен и на их границах меньше, чем в литье. Ударная вязкость материала достигает 70–75 Дж/см<sup>2</sup>.

Объемы выпуска указанных сталей и техническая информация по обработке как самих материалов, так и деталей из них, в первую очередь азотированных зубчатых колес внутреннего зацепления, ограничены [1], поэтому исследованы свойства различных материалов рассматриваемого класса при широком спектре режимов термообработки, отражающих практически все этапы изготовления колес. Максимальная величина твердости при температурах азотирования достигает 46–48 HRC и происходит, как следовало ожидать, у сталей, содержащих в своем составе никеля 5,25 % и алюминия ~2 %. При этом исходную твердость перед нарезанием зуба трудно получить ниже 37–38 HRC [4].

Одновременно следует указать, что в конструкционных сталях с содержанием никеля свыше 4 % возможно образование остаточного аустенита, что нежелательно, так как продукты его распада приводят не только к непрогнозируемому снижению прочности, но и к изменению геометрических размеров деталей, в том числе при эксплуатационной нагрузке.

По результатам теоретических и лабораторных исследований, а также промышленных экспериментов создана алюминийсодержащая сталь 20ХН4МФЮА (таблица 4).

На новый материал и способ изготовления зубчатых колес из него получен патент [10].

Наиболее характерные служебные особенности новой стали состоят в следующем [4]:

- нормализация при 920–925 °С, отпуск 690 °С,  $\tau = 3$  ч, воздух; закалка с 900–860 °С в масле и последующий отпуск при 690 °С с выдержкой не менее 3 ч обеспечивают минимальную твердость, получаемую при термообработке, и наилучшую

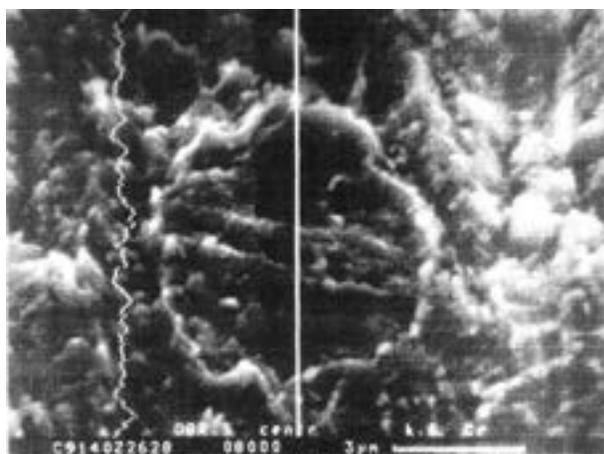


Рисунок 5 — Границы зерен в литой недеформированной стали 20ХН4МФЮА, увеличение  $\times 8000$

Figure 5 — Grain boundaries in cast undeformed 20ХН4МФЮА (20KhN4MFYuA) steel, magnification  $\times 8,000$

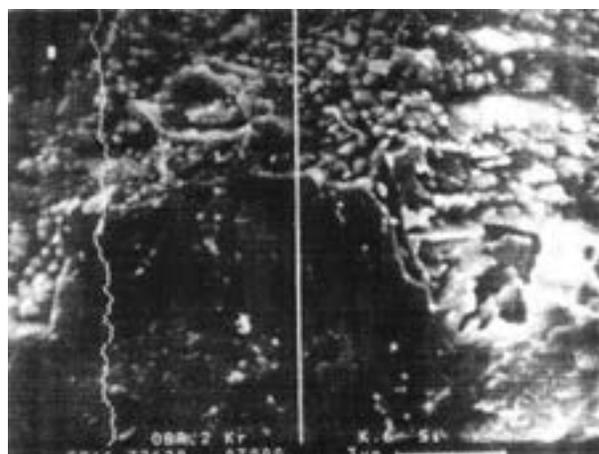


Рисунок 6 — Границы зерен в деформированной стали 20ХН4МФЮА (увеличение  $\times 7000$ )

Figure 6 — Grain boundaries of deformed 20ХН4МФЮА (20KhN4MFYuA) steel (magnification  $\times 7,000$ )

Таблица 4 — Химический состав стали 20ХН4МФЮА (%)  
Table 4 — Chemical composition of 20ХН4МФЮА (20KhN4MFYuA) steel (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Mo	V	S	P	Cu
0,17–0,22	0,07–0,37	0,4–0,6	0,4–0,6	3,9–4,2	0,8–1,2	0,4–0,6	0,10–0,15	≤0,025	≤0,025	≤0,20

Таблица 5 — Твердость стали 20ХН4МФЮА (Al = 0,8–1,2 %) после термических операций, используемых при изготовлении зубчатых колес [4]  
Table 5 — Hardness of 20ХН4МФЮА (20KhN4MFYuA) steel (Al = 0.8–1.2 %) after thermal operations used in the manufacture of gears [4]

Операция	Литье, НВ	Раскатка, НВ	Термообработка		Ионное азотирование		Дополнительный отпуск	
			нормализация + отпуск, НВ	закалка + отпуск, НВ	азотированная поверхность, HV <sub>5</sub>	сердцевина, HRC	азотированная поверхность, HV <sub>5</sub>	сердцевина, HRC
Твердость	320	320	235–290	255–269	900–930	40–41	766–780	36–37

механическую обрабатываемость, а также стабильное твердение при температурах азотирования;

- исходная твердость сердцевины материала (детали), равная 235–285 НВ, повышается до 300–400 НВ после азотирования; при этом сохраняется высокая способность к азотированию;
- повышение твердости при азотировании не приводит к изменению размеров и формы, крупногабаритных и сложных по форме деталей;
- сталь имеет широкий интервал температур старения и незначительно теряет твердость при температурах более высоких, чем температура старения; вязкость при этом увеличивается;
- деформирование стали в интервале температур 900–1200 °С не вызывает технологических трудностей.

При получении кольцевых заготовок предпочтительно использовать электрошлаковые технологии: получение цилиндрического слитка в водоохлаждаемом кристаллизаторе с последующей просечкой и раскаткой отдельных фрагментов слитка; или же получением литой кольцевой заготовки методом ЦЭШЛ и, при необходимости, проведения дополнительной раскатки.

Применение новой стали для изготовления азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением для редукторов карьерных самосвалов показало, что полученная сталь как в литом, так и в ковном состоянии после нормализации 920–925 °С, закалки с 900 °С в масле и отпуска 690 °С имеет достаточно высокие механические свойства. Литая сталь при твердости 277 НВ имеет следующие характеристики:  $\sigma_b = 882$  МПа,  $\sigma_t = 659$  МПа,  $\delta = 17,6$  %,  $\psi = 62$  %.

У прокованной стали все механические характеристики более высокие:  $\sigma_b = 1093,6$  МПа,  $\sigma_t = 949,7$  МПа,  $\delta = 24,4$  %,  $\psi = 62,9$  %. Ударная вязкость литой стали составляет КСУ = 26–27 Дж/см<sup>2</sup>; у кововой КСУ >130 Дж/см<sup>2</sup>.

В таком состоянии материал достаточно хорошо механически обрабатывается. Старение стали и деталей из нее для повышения их твердости и прочности целесообразно проводить в преде-

лах температур 500–590 °С. Твердость сердцевины после азотирования повышается от 27–28 до 43 HRC, но ударная вязкость у литого металла снижается до 12–13 Дж/см<sup>2</sup>. Отпуск после старения в пределах температур 590–620 °С позволяет повысить ударную вязкость почти в 10 раз: с 12 до 112,7 Дж/см<sup>2</sup> при твердости сердцевины 37 HRC. После азотирования слой и сердцевина стали приобретают мелкое зерно № 10–11 по ГОСТ 5639–82.

Стандовые испытания фрагментов созданных зубчатых колес (пульсирующий поперечный изгиб на установке Schenck) показали, что при коэффициенте асимметрии цикла, равном +0,3, предел выносливости деталей соответствует уровню циклической прочности цементируемых хромоникелевых сталей.

**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 — крупногабаритные детали модулем свыше 10 мм и диаметром более 1000 мм с повышенной толщиной упрочненного слоя (0,5–0,7 мм). Это позволяет обеспечивать ресурс зубчатых колес в жизненном цикле машин широкого назначения: карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности, 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 ОАО «БЕЛАЗ». При этом снижены стоимость, трудоемкость и энергоемкость производства, повышена его экологичность. Эко-

номическая эффективность использования разработки зависит и от объемов выпуска продукции. При использовании в карьерной технике она составила около 1 млн долл. США. Освоение новых материалов в металлургии (ОАО «Белорусский металлургический завод») и создание производства высокоточных азотированных зубчатых колес для потребностей машиностроения республики открывают новые возможности импортозамещения и экспорта в современных условиях.

### Список литературы

1. Кейз, С.Л. Алюминий в чугунах и сталях / С.Л. Кейз, К.Р. Ван Горн. — М.: Металлургиздат, 1959. — С. 457.
2. Лахтин, Ю.М. Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. — М.: Машиностроение, 1976. — С. 1–57.
3. Термическая обработка в машиностроении / под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. — М.: Машиностроение, 1980. — С. 322–344.
4. Харитончик, Д.И. Крупногабаритные зубчатые колеса с внутренним зацеплением из алюминийсодержащих сталей / Д.И. Харитончик, В.И. Моисеенко. — Минск: Беларус. навука, 2012. — 125 с.
5. 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.
6. Азотируемая сталь для зубчатых колес: пат. RU 2553764 / В.И. Моисеенко, А.Л. Сапунов, Н.Д. Шкатуло. — Опубл. 20.06.2015.
7. 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(18). — С. 71–75.
8. Конструкционная прочность и технологичность безалюминиевых сталей крупногабаритных азотированных зубчатых колес / В.В. Куриленко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2013. — № 1. — С. 60–66.
9. 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.
10. Способ изготовления зубчатых колес: пат. BY 9749 / В.И. Моисеенко, П.И. Папковский, Н.Д. Шкатуло, С.А. Шишко, Д.И. Харитончик, П.Л. Мариев. — Опубл. 30.10.2007.

VITYAZ Petr A., Academician of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Apparatus of the NAS of Belarus<sup>1</sup>

E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

SOTNIKOV Maksim V.

Junior Researcher of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High and Extra-High Capacity Dump Trucks<sup>2</sup>

E-mail: ks\_oim@tut.by

SIDORENKO Aleksandr G., Ph. D. in Eng.

Head of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High and Extra-High Capacity Dump Trucks<sup>2</sup>

E-mail: ks\_oim@tut.by

MOISEENKO Vladimir I., D. Sc. in Eng., Prof.

Chief Researcher of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High and Extra-High Capacity Dump Trucks<sup>2</sup>

E-mail: ks\_oim@tut.by

SHISHKO Sergey A.

Deputy Chief Designer<sup>3</sup>

E-mail: kbst@belaz.minsk.by

<sup>1</sup>Presidium of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>OJSC “BELAZ” — Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Republic of Belarus

Received 12 July 2021.

## NEW STEELS AND TECHNOLOGIES FOR NITRIDED PARTS OF LONG LIFE MACHINES

*The analysis of the used steels for nitrided parts is carried out. On the basis of a new methodology for increasing the strength of structural steels and parts, new scientific approaches and practical solutions are proposed and considered for the creation of gear wheels strengthened by nitriding both when using aluminum-containing steels and a new material, 40ХМФА (40KhMFA) steel, that does not contain aluminum. To improve the efficiency and manufacturability of parts production from aluminum-containing 38Х2МЮА (38Kh2MYuA) steel, widely used in mechanical engineering, a fundamentally new technology of preliminary heat treatment of part blanks, “incomplete quenching”, 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 flaking of nitrated layer. The research results are presented on 40ХМФА (40KhMFA) steel, which does not contain aluminum, has increased heat resistance, hardenability and workability of parts, as well as the characteristics of the hardened layer. The nitrated layer of gears with a thickness of 0.5–0.7 mm does not contain brittle components, which, with a core hardness of 300–320 HB, also excludes its flaking and subsequent destruction of parts. The use of 40ХМФА (40KhMFA) steel makes it possible to solve the problems of reliability and life of large-sized nitrated gears, but it is also promising for the entire range of gears with internal gearing, as well as parts of movable spline gearings and fine-modular gears in order to replace carburizing with nitriding.

**Keywords:** nitriding, microhardness, nitrated layer, mechanical characteristics

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-42-51>

## References

1. Case S.L., van Horn K.R. *Aluminum in iron and steel*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1953.
2. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D. *Azotirovanie stali* [Nitriding of steel]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. Pp. 1–57 (in Russ.).
3. Arendarchuk A.V., et al. *Termicheskaya obrabotka v mashinostroenii* [Heat treatment in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. Pp. 322–344 (in Russ.).
4. Kharitonchik D.I., Moiseenko V.I. *Krupnogabaritnye zubchatye kolea s vnutrennim zatsepleniem iz alyuminiysoderzhashchikh staley* [Large-sized gears with internal gearing made of aluminum-containing steels]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2012. 125 p. (in Russ.).
5. Moiseenko V.I., Mariev P.L. *Osnovy strukturnoy ravnoprochnosti stali i elementov krupnogabaritnykh detaley mashin* [Fundamentals of structural strength balance of steel and elements of large-sized machine parts]. Minsk, Institut kibernetiki NAN Belarusi Publ., 1999. 200 p. (in Russ.).
6. Moiseenko V.I., Sapunov A.L., Shkatulo N.D. *Azotiruemaya stal dlya zubchatykh kolea* [Nitrated steel for gears]. Patent RU, no. 2553764, 2015.
7. Kharitonchik D.I. *Konstruktsionnaya prochnost alyuminiysoderzhashchikh staley v krupnogabaritnykh azotirovannykh zubchatykh koleakh s vnutrennim zatsepleniem* [Structural strength of aluminum-containing steels in constructions of large-dimension nitrated internal gears]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2012, no. 1(18), pp. 71–75 (in Russ.).
8. Kurilenko V.V., Moiseenko V.I., Chuchurkin E.M., Shishko S.A. *Konstruktsionnaya prochnost i tekhnologichnost bezalyuminiyevykh staley krupnogabaritnykh azotirovannykh zubchatykh kolea* [Structural strength and manufacturability of steels not containing aluminum for large scale nitrated gears]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2013, no. 1(22), pp. 60–66 (in Russ.).
9. Vityaz P.A., Moiseenko V.I., Sidorenko A.G., Sotnikov M.V., Shkatulo N.D., Kharitonchik D.I. *Opyt i perspektivy ispolzovaniya konstruktsionnykh staley dlya azotirovannykh zubchatykh kolea* [Experience and prospects of use of structural steels for nitrated gears]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 58–65 (in Russ.).
10. Moiseenko V.I., Papkovskiy P.I., Shkatulo N.D., Shishko S.A., Kharitonchik D.I., Mariev P.L. *Sposob izgotovleniya zubchatykh kolea* [Method of manufacturing gears]. Patent BY, no. 9749, 2007 (in Russ.).