

УДК 621.833

В.В. КУРИЛЕНКО; В.И. МОИСЕЕНКО, д-р техн. наук; Е.М. ЧУЧУРКИН

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

С.А. ШИШКО

ОАО «БелАЗ» — управляющая компания холдинга «БелАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино

КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ БЕЗАЛЮМИНИЕВЫХ СТАЛЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АЗОТИРОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Рассматривается конструкционная прочность и технологичность азотированных крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением при использовании стали не содержащей в составе алюминий. Показано, что прочностные и эксплуатационные характеристики зубчатых колес из таких сталей выше, чем колес из серийных алюминийсодержащих сталей за счет основных показателей: твердости сердцевины, более высокой глубины азотирования, лучшей обрабатываемости и большей точности, отсутствия хрупких составляющих в азотированном слое.

Ключевые слова: зубчатые колеса, азотирование, толщина упрочненного слоя, легированная сталь, алюминий, технологичность, обрабатываемость, фрезерование, долбление

Введение. Крупногабаритные зубчатые колеса с внутренним зацеплением являются неотъемлемым элементом современных планетарных редукторов, используемых в транспортных средствах большой единичной мощности и производительности.

Современная карьерная техника характеризуется увеличением грузоподъемности самосвалов и ростом уклона дорог карьеров в связи с увеличением их глубины. Эти факторы подразумевают дальнейший рост габаритов деталей трансмиссии, наиболее важными элементами которой также являются зубчатые колеса. Задача поиска резервов увеличения нагрузочной способности основных элементов трансмиссии часто сводится к использованию новых, более прочных конструкционных материалов.

Для зубчатых колес с внутренним зацеплением особое значение имеет прочность зуба при изгибе, в то время как контактные нагрузки считаются более низкими, чем в случае зубчатых колес с внешним зацеплением. Большие габариты зубчатых колес определяют специфику их напряженно-состояния. Градиенты твердости в азотированном слое уменьшаются, в то же время твердость и сопротивление усталости подслоевых объемов материала существенно ниже, чем азотированного слоя, что часто приводит к появлению здесь при служебной циклической нагрузке пластической деформации. Это приводит к разрушению слоя при его недостаточной глубине и прочности.

Стали, используемые для производства азотированных зубчатых колес, делятся на содержащие в составе алюминий и не содержащие его. Первые, известные как нитраллои, обеспечивают крайне высокую твердость поверхности (до 1200 HV), но при этом глубина упрочненного слоя не превышает 0,3–0,4 мм. На ОАО «БелАЗ» широко применяется сталь этого типа — 38Х2МЮА. Стали, не содержащие в своем

составе алюминий, например сталь 40ХМФА, не обеспечивают таких высоких значений твердости поверхности (не более 700–800 HV), но толщина упрочненного слоя достигает 0,5–0,7 мм (рисунок 1).

Анализ возможности применения безалюминиевых сталей для азотированных зубчатых колес. Данные для определения пределов выносливости зубьев при изгибе $\sigma_{F_{limb}}^0$ для стальных азотированных зубчатых колес по основным расчетным методикам [1, 2] устанавливаются зависимостями в соответствии с таблицей 1 (подобные зависимости приведены и в других справочных материалах).

ГОСТ 21354-87 устанавливает ограничения на применение данного выражения: толщина упрочненного слоя должна лежать в некоторых пределах (см. последний столбец в таблице 1), а в структуре диффузионного слоя должна отсутствовать замкнутая нитридная сетка или ϵ -фаза. Если хотя

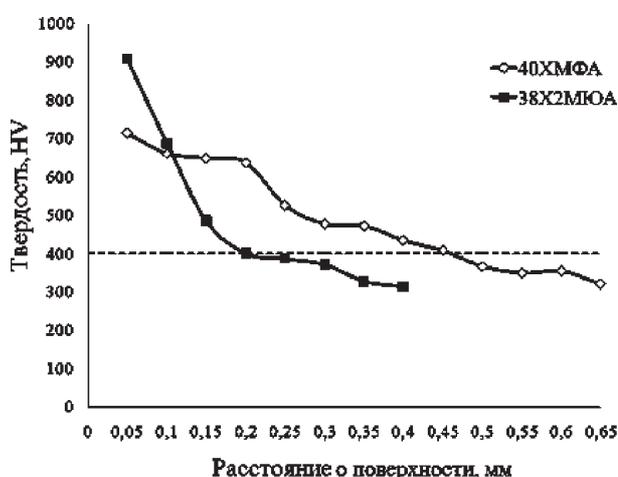


Рисунок 1 — Распределение микротвердости азотированного слоя, определенное на образцах из серийной стали 38Х2МЮА и опытной стали 40ХМФА

Таблица 1 — Параметры для определения предела выносливости зубьев азотированных зубчатых колес при расчетах на изгибную прочность

Сталь	Твердость зубьев		σ_{Flimb}^0 HRC серд.	Относительная толщина диффузионного слоя, m
	на поверхности, HV	в сердцевине у основания, HRC		
ГОСТ 21354-87				
Содержащая алюминий	700...950	24...40	290 + 12 (МПа)	0,07–0,1
Прочая легированная	550...750	24...40		0,1–0,13
Справочник металлиста под ред. Чернавского, т. 1				
Легированные стали	550...750	23...42	430 + 190 (кгс/см ²)	-

бы одно из этих условий не выполняется, то значение σ_{Flimb}^0 необходимо уменьшить на 20 %. В международном стандарте ISO 6336-2005 [3] тоже отмечается отсутствие влияния твердости поверхности на значение предела выносливости.

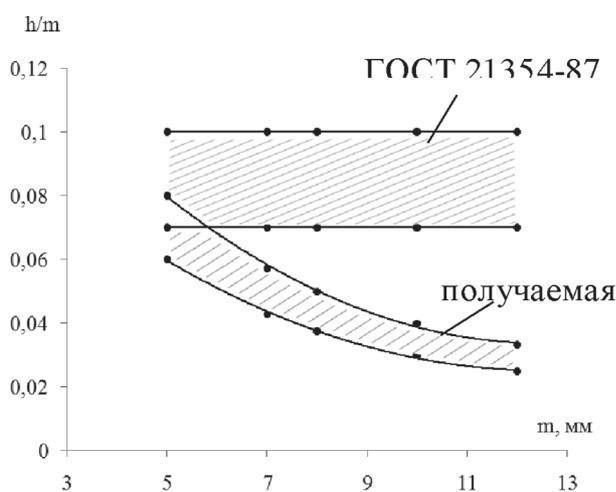
Максимальный эффект азотирования для зубчатых колес соответствует некоторой оптимальной глубине слоя [4–6]. При этом повышение предела выносливости достигает 20–30 %. Оптимальным диапазоном можно считать зависимости, приведенные в таблице 1 (последний столбец) При меньшей глубине слоя сопротивление усталости азотированных зубчатых колес определяется исключительно механическими свойствами исходного материала, лежащего ниже упрочненного слоя. [4]. Можно графически изобразить границы использования формулы для определения предела выносливости (рисунок 2).

Как видно, глубина азотированного слоя по ГОСТ 21354-87 не достигает оптимальной для алюминийсодержащих сталей при модуле 6 мм (см. ри-

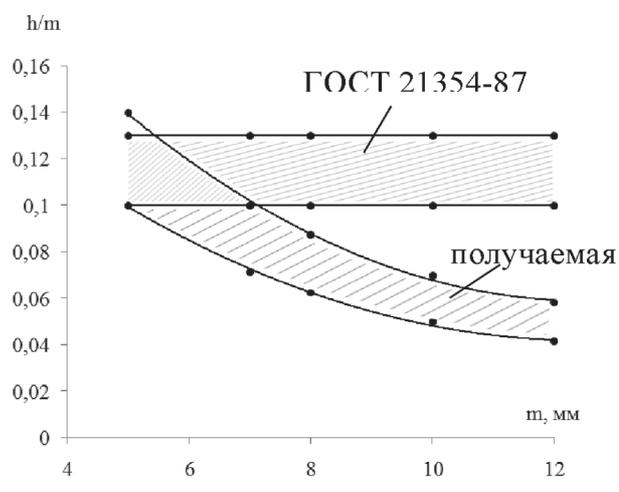
сунок 2 а), для безалюминиевой при модуле 7 мм (см. рисунок 2 б).

Согласно стандарту ISO 6336-2005 [3], для зубчатых колес с модулем более 7 мм «эффективная толщина упрочненного слоя» должна лежать в пределах 0,4–0,7 мм (рисунок 3). Под понятием эффективная толщина азотированного слоя подразумевается расстояние от поверхности до точки, в которой значение твердости составит 400 HV или 41 HRC. В случае если твердость сердцевины превышает 380 HV, при определении эффективной толщины может быть использовано значение твердости, определяемое как $H_{серд.} + 50$ HV.

В ГОСТ 21354-87 толщину диффузионного слоя рекомендуется определять как толщину слоя до структуры сердцевины. Рекомендуемому ISO 6336-2005 диапазону эффективной глубины упрочненного слоя лучше удовлетворяет сталь 40ХМФА (см. рисунок 1), значения эффективной толщины азотированного слоя у которой, как правило, составляет не менее 0,45 мм.



а



б

Рисунок 2 — Глубина азотированного слоя, требуемая по ГОСТ 21354-87 и получаемая на практике, с ростом модуля зубчатых колес: а — сталь, содержащая алюминий, б — безалюминиевая сталь

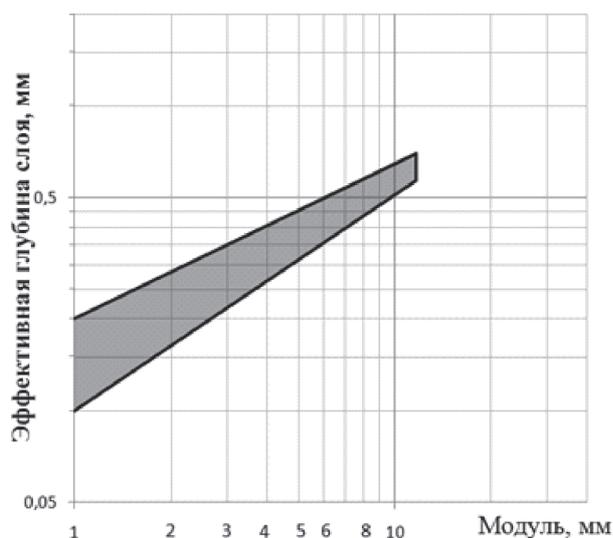


Рисунок 3 — Рекомендованные значения эффективной толщины слоя в ISO 6336-2005 [3]

Считается, что в общем случае основными факторами повышения сопротивления усталости деталей машин при поверхностном упрочнении являются: увеличение прочности металла поверхностного слоя, остаточные сжимающие напряжения в слое, переход очага зарождения усталостной трещины с поверхности в подслоиную область [4]. Особенностью конструкционной прочности азотированных сталей является тот факт, что с ростом твердости азотированного слоя его пределы прочности и выносливости не увеличиваются. По данным [5], полученным на микрообразцах, вырезанных из различных зон слоя, предел прочности азотированного слоя может снижаться с ростом твердости. Особенно резко падает прочность азотированного слоя при использовании стали 38Х2МЮА [4]. Это связывается с охрупчиванием слоя.

Повышение пределов выносливости при азотировании часто связывают с влиянием сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое [4–6], хотя иногда эта точка зрения подвергается сомнению [7].

В пределах упрочненного слоя образуются остаточные напряжения сжатия, величина которых на поверхности достигает 500–1000 МПа. Эпюра остаточных напряжений показывает постепенное снижение напряжений от поверхности к сердцевине (рисунок 4). В переходной зоне возникают растягивающие напряжения, величина которых достигает 200–300 МПа. Чем выше относительное количество поглощенного сталию азота, тем большие объемные изменения при прочих равных условиях испытывает упрочненный слой и тем большей величины остаточные напряжения в нем возникают.

Наиболее высокая концентрация азота в поверхностных слоях азотированного слоя наблюдается в сталях, легированных алюминием. Остаточные напряжения в стали 38Х2МЮА достигают 900–1000 МПа. В сталях без алюминия количество

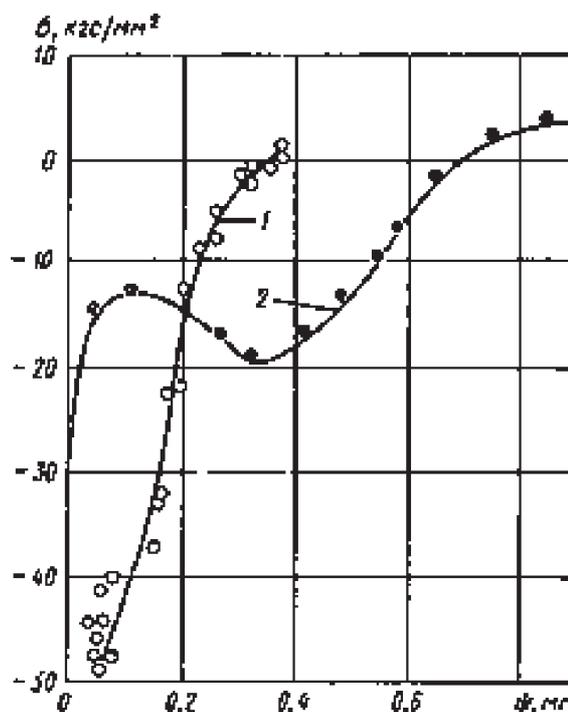


Рисунок 4 — Распределение остаточных напряжений по глубине диффузионного слоя: азотирование, цементация [4]

поглощенного азота ниже, как следствие этого уменьшаются и остаточные напряжения сжатия.

Считается доказанным, что предел выносливости азотированных образцов тем больше, чем выше прочность исходного материала (сердцевины) [4–6]. Сталь 38Х2МЮА, как сказано выше, имеет меньшие значения предела выносливости, несмотря на высокие сжимающие остаточные напряжения. Это связано с повышенной хрупкостью слоя и чувствительностью к концентрации напряжений, а также более низкой допускаемой (из-за низкой обрабатываемости) прочности сердцевины. Наиболее высокое сопротивление усталости при изгибе имеют стали без алюминия — у них прочность сердцевины выше [4].

По пределу контактной прочности азотированная сталь соизмерима с цементованной сталью, но отличается большим разбросом значений и чувствительностью к перегрузкам. Стойкость против образования питтинга у азотированных конструкционных сталей невелика. При повышенных контактных напряжениях глубина азотированного слоя должна быть не менее 0,4–0,5 мм [4].

Существенным недостатком азотированных зубчатых колес является снижение усталостной долговечности в результате любой мгновенной перегрузки. Для зубчатых колес цементированных или закаленных кривая усталости для исходного и поврежденного в результате мгновенной перегрузки материала остается более или менее постоянной (сплошная и штрихованная линии на рисунке 5 а). К сожалению, это правило не выполняется для азотированных зубчатых колес. Испытания показывают, что азотированные зубчатые колеса не обладают такой же способностью противостоять пе-

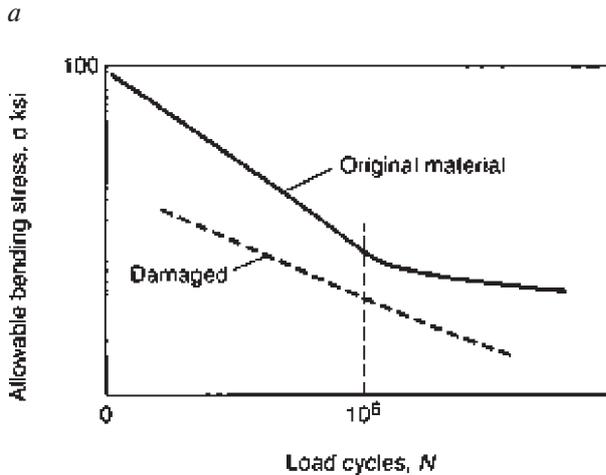
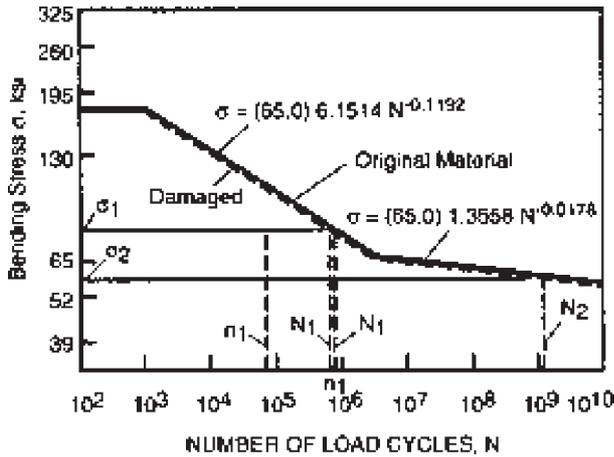


Рисунок 5 — Кривые усталости для зубчатых колес, с учетом влияния перегрузок: а — цементированные и закаленные; б — азотированные [8]

регрузкам, как цементированные. На самом деле, предел ограниченной выносливости даже однократно подвергнутых перегрузке азотированных зубчатых колес оказывается немного ниже, чем у свежего материала, как показано на рисунке 5 б [8]:

Также азотированным деталям присуща склонность к уменьшению долговечности при действии нагрузки, которая, хоть и не превышает номинального значения, но изменяется в широком диапазоне за короткий промежуток времени. В [8] рассматривается выход из строя планетарной передачи, сателлит и солнечная шестерня которой были выполнены азотированными, после 16 000 часов работы при расчетных 100 000 часов. Причиной разрушения послужила колеблющаяся нагрузка.

Вышеперечисленное показывает актуальность исследований, направленных на замену алюминийсодержащих сталей 38Х2МЮА сталями, не содержащими алюминий.

Твердость сердцевины серийной стали 38Х2МЮА обычно не превышает 285 НВ. При этом наличие алюминия, расположенного крайне неравномерно в стали, негативно сказывается на обрабатываемости. Повышенная обрабатываемость безалюминиевых сталей

открывает возможность повышения твердости до уровня 320 НВ, что, согласно расчетным зависимостям, существенно повысит долговечность зубчатых колес, а отсутствие алюминия в составе стали позволит снизить хрупкость упрочненного слоя.

Низкая обрабатываемость зубчатых колес при их значительных размерах (количество зубьев > 100, длина зуба более 150 мм) не позволяет получать высокоточные колеса, особенно при долблении зубьев, из-за износа режущего инструмента и невозможности его замены в процессе формирования зубчатого венца.

Оценка технологичности стали 40ХМФА. Для оценки и повышения технологичности, а также увеличения конструкционной прочности безалюминиевых сталей исследовалась обрабатываемость сталей при формировании зубчатого венца как фрезерованием, так и долблением.

С этой целью производилось нарезание зубьев для трех опытных партий зубчатых колес (I–III партий, таблица 2) на фрезерных станках Liebhfer LFS 1202 за 2 прохода (черновой и чистовой) твердосплавными фрезами.

Обрабатываемость деталей проверялась по мощности, потребляемой при нарезании зубьев, и по износу режущего инструмента. Точность и качество поверхности обработанных шестерен проверялось на контрольно-измерительной машине (КИМ).

Каждый этап обработки включал нарезание 75 впадин. Показатели значения мощности резания непрерывно изменяются по ширине венца с увеличением по мере продвижения фрезы в глубину материала (рисунок 6). Характер изменения мощности по ширине обода может существенно изменяться на различных обрабатываемых впадинах.

Измерялись пиковые значения на каждой обрабатываемой впадине (рисунок 7). По результатам замеров определялись средние значения потребляемой мощности резания (таблица 3).

С увеличением твердости мощность при обработке стали 40ХМФА возрастает, но она несколько ниже, чем на стали 38Х2МЮА при одинаковой твердости материала.

Таблица 2 — Параметры заготовок опытных партий зубчатых колес

Параметр	Партия зубчатых колес		
	I партия	II партия	III партия
Количество деталей	18	18	19
Твердость заготовки, НВ	269–302	310–331	310–331
Микро-структура	Сорбит отпуска	Сорбит отпуска	Сорбит отпуска с содержанием феррита 3–5 %

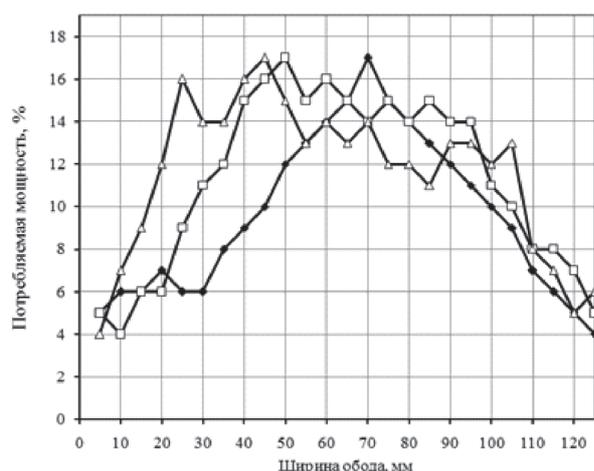


Рисунок 6 — Типичный характер изменения потребляемой мощности при формировании зуба по ширине обода

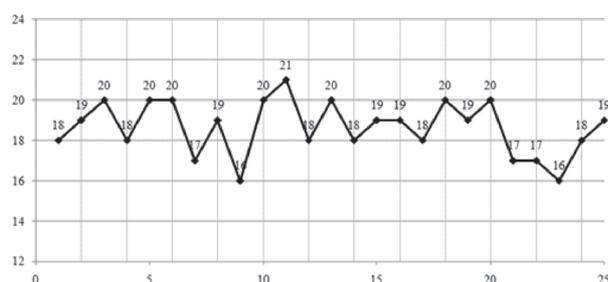


Рисунок 7 — Характер изменения пиковых значений потребляемой мощности при формировании зуба на первых 25 впадинах детали зубчатого колеса

Для оценки обрабатываемости дополнительно производился замер износа пластинок фрезы

Таблица 3 — Оценка обрабатываемости сталей 40ХМФА и 38Х2МЮА по потребляемой мощности резания

№ детали по чертежу	Материал	Твердость, НВ	Средняя потребляемая мощность резания, %	Режим резания, V_c м/с/ S , мм	Примечание
7547-2405050	Сталь 40ХМФА, I партия	269–302	18,9	306/90	шестая деталь на фрезе
7547-2405050	Сталь 40ХМФА, II партия	310–331	18,12	288/90	новая деталь на фрезе
7547-2405050	Сталь 40ХМФА, II партия	310–331	19,35	306/90	вторая деталь на фрезе
7547-2405050	Сталь 40ХМФА, III партия	310–331	19,4	306/90	новая фреза
75132-2405284	Сталь 38Х2МЮА	269–302	22	—	пятая деталь на фрезе
75132-2405284	Сталь 38Х2МЮА	269–302	21,8	—	шестая деталь на фрезе

Таблица 4 — Оценка обрабатываемости сталей 40ХМФА и 38Х2МЮА по износу инструмента при зубофрезеровании

№ детали по чертежу	Сталь	Твердость, НВ	Среднее значение потребляемой мощности	Износ пластины, мм	
				Левая сторона фрезы	Правая сторона фрезы
7547-2405050	40ХМФА	320–331	19,4	0,172	—
75132-2405284	38Х2МЮА	269–302	17,66	0,174	0,161

для чернового прохода при нарезании зубьев зубчатых колес из сталей 40ХМФА и 38Х2МЮА (таблица 4).

Точность полученных из стали 40ХМФА зубчатых колес соответствует требованиям чертежа, а при твердости колес 285–302 НВ может достигать 6 степеней точности (таблица 5).

При более ранних сравнительных исследованиях обрабатываемости зубчатых колес повышенных габаритов и модулей (количество зубьев > 110 , $m > 7$ мм) при одинаковой твердости (около 280 НВ) потребляемая мощность на стали 38ХМ оказалась на 20–25 % ниже, чем на стали 38Х2МЮА.

При зубодолблении сравнительная обрабатываемость оценивалась на однотипных деталях из сталей, которые прошли специальную термообработку: «неполную закалку» [9], что позволило получать в структуре материала 3–5 % феррита при твердости 270–285 НВ долбяками из быстрорежущей стали 6РМ5.

Зубодолбление колес осуществлялось на станке мод. 5Б150 с типовым технологическим режимом за два прохода (черновой и чистовой) с восстановлением режущих свойств инструмента после обработки каждой детали (таблицы 6, 7).

Точность зубчатого колеса из стали 40ХМФА соответствует требованиям КД, но несколько ниже, чем при зубофрезеровании (таблица 8).

Лучшая обрабатываемость колес из стали 40ХМФА открывает новые возможности повышения надежности и ресурса колес из этого материала. Это качество приобретает значимость при

Таблица 5 — Точность зубчатых колес изготовленных из стали 40ХМФА зубофрезерованием

№ детали	Материал	Параметры по ГОСТ 1643-81			
		Степень точности	F_z , мм	f_r , мм	F_{β} , мм
7547-2405050	40ХМФА, требования чертежа	10-9-8	0,16	0,045	0,032
	I партия 285–302 НВ	—	0,034	0,016	0,012
	II партия 320–331 НВ		0,07	0,017	0,014
	III партия 320–331 НВ		0,16	0,028	0,011

Таблица 6 — Оценка износа долбяков при формировании зубьев детали 7547-2405050 (сталь 40ХМФА)

Номер детали	Термообработка		Детали с номером	Машинное время долбления	Инв. № долбяка	Износ долбяка *
	твёрдость, НВ	микроструктура				
7547-2405050	270	Сорбит с 3–5 % феррита	1	520	753	0,25
			2	450	753	0,2
			3	450	167	0,2
			4	450	753	0,3

* — максимальный износ долбяка на отдельных зубьях после обработки 1 детали

Таблица 7 — Оценка износа долбяков при формировании зубьев детали 75450-2405050 (сталь 38Х2МЮА)

Номер детали	Термообработка		Детали с номером	Машинное время долбления	Износ долбяка, мм	Примечание
	тв., НВ	микроструктура				
75450-2405050	285	Сорбит с 3–5 % феррита	1	350	0,65–0,7	Долбяк новый, покрытый TiN
			2	450	1,0	Долбяк шлифован несколько раз
			3	450	1,0	

Таблица 8 — Оценка точности изготовления зубчатых колес 7547-2405050

№ детали	Материал	Параметры по ГОСТ 1643-81			
		Степень точности	F_z , мм	f_r , мм	F_{β} , мм
7547-2405050	40ХМФА	10-9-8 требования чертежа	0,16	0,045	0,032
		результаты замеров	0,022	0,0428	0,0305

увеличении массы машины, передаваемых мощностей, и неизбежном росте динамических нагрузок в передаче.

Предел выносливости при стендовых усталостных испытаниях фрагментов колес из стали 40ХМФА, полученных зубофрезерованием достигает 520 МПа (поперечный изгиб).

Эксплуатационные испытания в различных климатических и производственных условиях также подтвердили более высокую эффективность стали 40ХМФА в сравнении со сталью 38Х2МЮА в части обеспечения конструкционной прочности крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением.

Заключение. Конструкционная прочность крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением при использовании безалюминиевой стали 40ХМФА заметно выше, чем у таких же колес из стали 38Х2МЮА. Это обусловлено основными показателями: твердостью сердцевины, большей точностью, отсутствием в слое хрупких составляющих.

Технологичность (обрабатываемость) стали 40ХМФА с твердостью 320–331 НВ и стали 38Х2МЮА с твердостью 269–302 НВ на фрезерных станках Liebherr LFS-1202 практически одинакова на одних и тех же режимах резания. Точность изготовления колес при измерении на КИМ выше заложенной в КД — до 6-ой степени точности.

При формировании зуба долблением точность зубчатого колеса соответствует требованиям КД, но несколько ниже, чем при зубофрезеровании. При этом на стали 40ХМФА износ режущего инструмента существенно ниже, чем на стали 38Х2МЮА.

Использование стали 40ХМФА следует рассматривать как наиболее эффективный путь повышения конструкционной прочности крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением.

Список литературы

1. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность: ГОСТ 21354-87.
2. Справочник металлста / под ред. С.А. Чернавского: в 5 т. — Т. 1. — М.: Машиностроение, 1976. — 673 с.
3. ISO 6336-2005 Calculation of load capacity of spur and helical gears. — Part 5: Strength and quality of materials.
4. Лахтин, Ю.М. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.И. Шипс. — М.: Металлургия, 1991. — 318 с.
5. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Рук-во и справ. пособие / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович; под ред. С.В. Серенсена. — М. Машиностроение, 1975. — 488 с.
6. Повышение несущей способности механического привода / под ред. В.М. Кудрявцева. — М.: Машиностроение, 1973. — 223 с.
7. Терентьев, Е.Ф. Использование азотирования для изменения механических характеристик металлических материалов / В.Ф. Терентьев, А.Г. Колмаков, М.С. Мичугина // Сб. статей по материалам I междунар. конф. «Деформация и разрушение материала»; ИМЕТ им. Байкова РАН. — М. — 2006. — С. 457–463.
8. Davis, J.R. Gear Materials, Properties, and Manufacture / J.R. Davis // ASM International. — 2005. — 339 p.
9. Харитончик, Д.И. Конструкционная прочность алюминий содержащих сталей в крупногабаритных азотированных зубчатых колесах с внутренним зацеплением / Д.И. Харитончик // Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 1(18). — С. 71–74.

Kurilenko V.V., Moiseenko V.I., Chuchurkin E.M., Shishko S.A.

Structural strength and manufacturability of steels not containing aluminum for large scale nitrided gears

This paper deals with structural strength and machinability of large scale nitrided internal spur gears when using steels not containing aluminum. It has been shown that strength and service properties of gears made from such steel grades are higher than from serial aluminum steels for their principal characteristic: core hardness, higher case depth, better machinability and accuracy and absence of brittle components in nitrided case.

Поступила в редакцию 28.01.2013.