

УДК 621.833: 621.785.53

Д.И. ХАРИТОНЧИКзаместитель генерального директора по качеству¹**А.П. ГАЛИН**инженер-конструктор I-й категории¹**П.Г. КАРПОВИЧ**начальник конструкторского бюро мотор-колес¹**А.Н. КРИВОНОС**младший научный сотрудник²

E-mail: ks_oim@tut.by

В.И. МОИСЕЕНКО, д-р техн. наук, профессорглавный научный сотрудник²¹ОАО «БелАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 02.05.2016.

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ОБОДЬЕВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АЗОТИРОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ВНУТРЕННИМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Предложен новый метод экспериментальной оценки предела выносливости ободьев крупногабаритных азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением путем испытания их фрагментов (секторов) при циклическом поперечном изгибе. Проведена сравнительная оценка изменения циклической прочности ободьев из стали 38Х2МЮА, вызванного азотированием и различными режимами термообработки деталей перед азотированием.

Ключевые слова: зубчатые колеса, внутреннее зацепление, азотирование, циклическая прочность, ободья колес, упрочненный слой, твердость обода

Введение. Выход из строя крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением, используемых в планетарных редукторах мобильных машин, достаточно часто происходит из-за разрушения ободьев у ножки зуба по причине недостаточной их толщины (при целенаправленном снижении металлоемкости детали) и прочности материала, а также наличия острого концентратора напряжений в этой зоне, несмотря на барьерное действие модифицированного поверхностного слоя и остаточные напряжения сжатия в нем [1–17].

Известные методические подходы к созданию азотированных колес касаются в основном деталей с наружным зацеплением [8, 9]. Принципы суммирования напряжений изгиба зуба и обода теоретически не разработаны [10]. В зарубежной практике несколько лет назад появились работы по оценке и оптимизации конструкции и размеров колес (в том числе их ободьев) с внутренним зацеплением [11, 12]. Но и они требуют дополнительной проверки.

В работе [16] приведены результаты повышения несущей способности крупногабаритных зубчатых колес (в том числе их ободьев) с применением технологий, основанных на управлении свойствами сталей путем формирования состава,

структуры и свойств приграничных нанообъемов зерен конструкционного материала. Была проведена и экспрессная сравнительная оценка циклической прочности элементов обода, в структуре материала которого (сорбите) формировалось различное регламентированное количество феррита повышенной твердости.

Практика доступного экспериментального исследования важнейшей характеристики — предела выносливости ободьев крупногабаритных азотированных колес с внутренним зацеплением — авторам неизвестна. Поэтому в данной работе разрабатывается методика экспериментальной оценки циклической прочности ободьев указанных колес, и представлены результаты ее применения.

Разработка метода оценки циклической прочности ободьев крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением. Оценку прочностных свойств предложено проводить по пределу выносливости обода фрагментов венца натурной шестерни при циклическом поперечном изгибе (рисунок 1).

В связи с тем, что испытания проводятся с малым количеством образцов (1–2 шестерни каждого вида из-за их высокой стоимости), использовался метод полнобазных ступенчатых перегрузок [18].

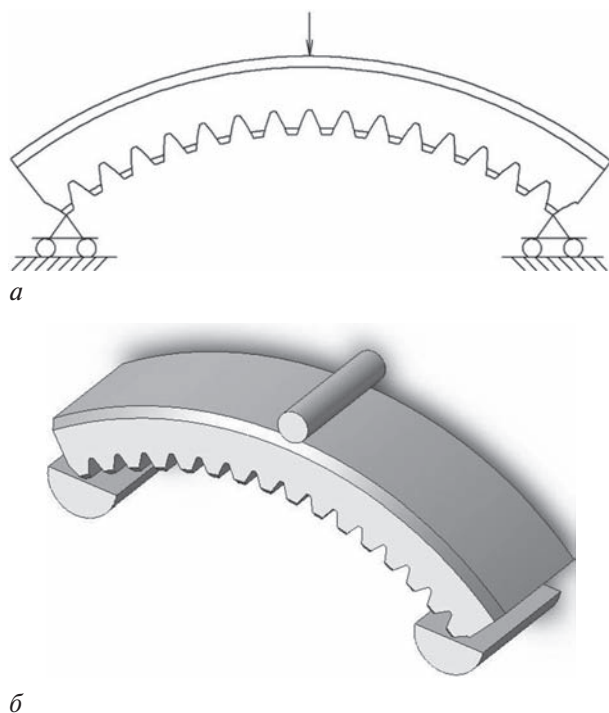


Рисунок 1 — Испытуемый образец на качающихся опорах:
а — схема нагружения; б — трехмерная модель

При этом предполагается, что действие нагрузки на ступенях ниже предела выносливости не вызывает в образце никаких повреждений. Рассматриваемый метод помогает существенно (примерно в 2 раза) экономить на числе образцов при статистической обработке результатов и принципиально допускает определение предела выносливости даже при испытаниях одного образца детали.

Для испытаний из каждой шестерни были изготовлены образцы путем ее разделения на 4–8 частей, в зависимости от диаметра шестерни (см. рисунок 1 а). Кривизна образца позволяет вести оценки НДС, как для прямого бруса.

В проведенных экспериментах, с использованием предложенного метода, образцы устанавливались на цилиндрических качающихся опорах и нагружались циклической нагрузкой через упор с помощью гидропульсатора (см. рисунок 1 б). Как показывает анализ, силами трения в опорах можно пренебречь из-за их малой величины.

Каждый образец в соответствии с принятой схемой нагружения испытывался на стенде по следующей методике: первый образец испытывался при расчетном напряжении, близком к ожидаемому пределу выносливости, который, как правило, известен по прототипам или ориентировочно может определяться расчетом. Если он не ломался в течение заданного базового числа циклов, то его перегружали на ступень выше и т. д., пока образец не сломается. Обычно за базу испытаний принимают $10^7 \dots 5 \cdot 10^7$ циклов, а за ступень перегрузки — 10 МПа. Здесь оказались достаточными база $5 \cdot 10^6$ и ступень перегрузки 20 МПа. Второй и последующий образцы

также нагружали ступенчато (после прохождения базы испытаний на каждой ступени), начиная с нагрузки на одну ступень ниже той, на которой сломался предыдущий образец.

Предел выносливости определяли по уровню нагрузки, при которой не сломался ни один из образцов.

В тех случаях, когда число образцов позволяло применить статистические методы обработки экспериментальных данных, предел выносливости определялся по зависимостям, используемым в методах математической статистики [18].

По технологическим причинам (исходя из необходимости устойчивой работы стенда) был принят асимметричный цикл нагружения с коэффициентом асимметрии $r = 0,32$. Соответственно этому выбраны блоки нагружения для шестерен различного исполнения (таблицы 1, 3).

Испытания проводились в экспериментальном цехе ОАО «БелАЗ — управляющая компания холдинга БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» на сервогидравлической машине для усталостных испытаний Instron 8805 с нагрузочной способностью 1000 кН (рисунок 2 а).

С использованием приведенной методики и указанного оборудования проведены сравнительные испытания трех партий фрагментов (см. рисунок 2 б) азотированных зубчатых колес (материал — сталь 38Х2МЮА, наружный диаметр — 1000 мм, ширина обода — 80 мм, согласно образцам-свидетелям толщина азотированного слоя — 0,40–0,50 мм, модуль зуба — 7 мм, количество зубьев — 117, радиус

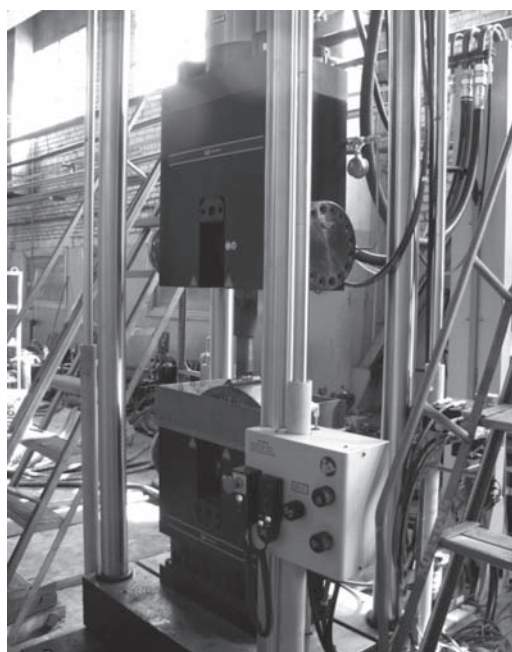
Таблица 1 — Фрезерованный зуб, неполная закалка

№ образца	Блок нагружения, кН	Параметры цикла нагружения, МПа	Наработка, кол-во циклов
1	$F_{\max} = -13,67$ $F_{\min} = -42,73$	$\sigma_{\max} = 480$ $\sigma_{\min} = 154$	484305
2	$F_{\max} = -14,24$ $F_{\min} = -44,51$	$\sigma_{\max} = 500$ $\sigma_{\min} = 160$	145650
3	$F_{\max} = -13,67$ $F_{\min} = -42,73$	$\sigma_{\max} = 480$ $\sigma_{\min} = 154$	4574000
4	$F_{\max} = -13,67$ $F_{\min} = -42,73$	$\sigma_{\max} = 480$ $\sigma_{\min} = 154$	110917
5	$F_{\max} = -14,24$ $F_{\min} = -44,51$	$\sigma_{\max} = 500$ $\sigma_{\min} = 160$	213956
6	$F_{\max} = -13,67$ $F_{\min} = -42,73$	$\sigma_{\max} = 480$ $\sigma_{\min} = 154$	827310
7	$F_{\max} = -14,24$ $F_{\min} = -44,51$	$\sigma_{\max} = 500$ $\sigma_{\min} = 160$	142470
8	$F_{\max} = -13,67$ $F_{\min} = -42,73$	$\sigma_{\max} = 480$ $\sigma_{\min} = 154$	104637

Таблица 2 — Результаты испытаний образцов 1-й серии. Параметры, необходимые для статистической оценки результатов

σ_{max}	Образцы								Параметры					
	1	2	3	4	5	6	7	8	i	i^2	n_i	$i \cdot n_i$	$i^2 \cdot n_i$	
520 МПа														
500 МПа		X			X		X		2	4	3	6	12	
480 МПа	X	0	X	X	0	X	0	X	1	1	5	5	5	
460 МПа	0	0	0	0	0	0	0	0						
440 МПа	0													
420 МПа														
400 МПа														
									Σ		8	11	17	

Примечание: Знак «О» — образец не сломался на данной ступени нагружения до базового числа циклов $5 \cdot 10^6$; знак «X» — образец сломался на данной ступени нагружения при наработке, указанной в таблице 1; i — порядковый номер ступени нагружения; n_i — число разрушенных образцов на i -й ступени нагружения



а



б

Рисунок 2 — Сервогидравлическая машина для усталостных испытаний Instron 8805: а — испытательная машина в экспериментальном цехе; б — испытания образца

переходной поверхности у ножки зуба — 2,6 мм), дополнительно обладающих следующими конструкторско-технологическими признаками:

Вариант № 1 (серия № 1): изготовление зуба фрезерованием, «неполная» закалка, твердость сердцевины зуба и обода 270 НВ — 8 шт.

Вариант № 2 (серия № 2): изготовление зуба фрезерованием, «полная» закалка, твердость сердцевины зуба и обода 278 НВ — 5 шт.

Вариант № 3 (серия № 3): изготовление зуба фрезерованием, «полная» закалка, твердость сердцевины зуба и обода 278 НВ, азотированный слой удален специальным приспособлением с сохранением радиуса переходной поверхности у ножки зуба — 3 шт.

При «полной» закалке время выдержки выше точки AC_3 — 2,5 ч, структура — сорбит. При «неполной» закалке время выдержки выше точки AC_3 сокращено, структура — сорбит и 3–5 % феррита, повышенной твердости: 200–230 НВ_{0,025} [16, 19].

При исследовании образцов 1-й серии максимальное напряжение цикла для разрушенных образцов составляло 500 МПа, минимальное — 480 МПа (см. таблицу 1). При максимальном напряжении цикла, равном 460 МПа, образцы не разрушались на базе испытаний $5 \cdot 10^6$ циклов (см. таблицу 2). Таким образом, предел выносливости по экспериментальным данным составляет 460 МПа.

Оценка результатов испытаний статистическим методом проведена по методу, изложенному в работе [18]. Среднее значение предела выносливости σ_r вычислялось как:

$$\sigma_r = \sigma_{нижн} + d \left(\frac{\sum i n_i}{k} - 0,5 \right) = 460 + 20 \left(\frac{8}{8} - 0,5 \right) = 470 \text{ МПа.} \quad (1)$$

Среднее квадратичное отклонение S предела выносливости вычислено по тому же методу [18]:

$$S = 1,62 + d \left[\frac{k \sum i^2 n_i - (\sum i n_i)^2}{k^2} + 0,03 \right] =$$

$$= 1,62 + 20 \left[\frac{8 \cdot 17 - 11^2}{8^2} + 0,03 \right] \approx 6,93 \text{ МПа}, \quad (2)$$

где (для всех вычислений) $\sigma_{\text{нижн}}$ — напряжение, соответствующее нижней ступени нагружения; i — порядковый номер ступени нагружения; n_i — число разрушенных образцов на ступени i ; k — общее число разрушенных образцов; d — величина ступени нагружения.

Нагрузочные уровни при испытаниях образцов с «полной» закалкой были выше, чем при исследованиях фрагментов деталей, прошедших перед азотированием «неполную» закалку (таблица 3).

По экспериментальным данным предел выносливости для испытанных образцов достигает 500 МПа (таблица 4), что превышает на 10 % предел выносливости таких же образцов деталей, подвергнутых «неполной» закалке перед азотированием (таблица 2).

При статистической оценке результатов испытаний с использованием вышеупомянутого метода [18] среднее значение предела выносливости составило 518 МПа, а среднее квадратичное отклонение предела выносливости — 7 МПа.

Испытания образцов 3-й серии (фрезерованный зуб, «полная» закалка, азотированный слой снят) показали, что предел выносливости по экспериментальным данным составил 360 МПа, т. е. понизился почти на 30 %, что свидетельствует о заметном влиянии азотированного слоя на циклическую прочность зубчатых колес.

Заключение. 1. В планетарных редукторах мобильных машин большой единичной мощности применяются азотированные зубчатые колеса с внутрен-

Таблица 3 — Фрезерованный зуб, полная закалка

N образца	Блок нагружения, кН	Параметры цикла нагружения, МПа	Наработка, кол-во циклов
1	$F_{\text{max}} = -14,81$ $F_{\text{min}} = -46,29$	$\sigma_{\text{max}} = 520$ $\sigma_{\text{min}} = 166$	170520
2	$F_{\text{max}} = -15,38$ $F_{\text{min}} = -48,07$	$\sigma_{\text{max}} = 540$ $\sigma_{\text{min}} = 173$	2794000
3	$F_{\text{max}} = -14,81$ $F_{\text{min}} = -46,29$	$\sigma_{\text{max}} = 520$ $\sigma_{\text{min}} = 166$	181690
4	$F_{\text{max}} = -15,38$ $F_{\text{min}} = -48,07$	$\sigma_{\text{max}} = 540$ $\sigma_{\text{min}} = 173$	1536000
5	$F_{\text{max}} = -14,81$ $F_{\text{min}} = -46,29$	$\sigma_{\text{max}} = 520$ $\sigma_{\text{min}} = 166$	442685

Таблица 4 — Результаты испытаний образцов 2-й серии. Параметры, необходимые для статистической оценки результатов

σ_{max}	Образцы					Параметры				
	1	2	3	4	5	i	i^2	n_i	$i \cdot n_i$	$i^2 \cdot n_i$
560 МПа										
540 МПа		X		X		2	4	2	4	8
520 МПа	X	0	X	0	X	1	1	3	3	3
500 МПа	0	0	0	0	0					
480 МПа	0									
						Σ		5	7	11

Примечание: Знак «О» — образец не сломался на данной ступени нагружения до базового числа циклов $5 \cdot 10^6$; знак «X» — образец сломался на данной ступени нагружения при наработке, указанной в таблице 1; i — порядковый номер ступени нагружения; n_i — число разрушенных образцов на i -й ступени нагружения. Предел выносливости по экспериментальным данным составляет 500 МПа

ним зацеплением, работоспособность которых регламентируется циклической прочностью обода, определяемой его сечением и прочностью используемого материала. Предложен и апробирован метод оценки циклической прочности указанных деталей, основанный на определении предела выносливости обода при поперечном циклическом изгибе фрагментов (секторов), выделенных из колес.

2. «Неполная» закалка, применяемая для улучшения обрабатываемости крупногабаритных азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением, незначительно — не более, чем на 10 % — снижает предел выносливости их обода при циклическом поперечном изгибе, при уменьшении твердости сердцевины зубьев не более, чем на 5–6 % в сравнении с обработкой заготовок по режиму «полной» закалки.

3. Азотирование повышает предел выносливости обода при циклическом поперечном изгибе фрагментов крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением до 30 %.

Список литературы

1. Терентьев, В.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. А.А. Байкова РАН. — М., 2006. — С. 457–463.
2. Энциклопедия по машиностроению XXL, оборудование, материаловедение, механика и ... [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://mash-xxl.info/info/127433/>. — Дата доступа: 12.05.2016.
3. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин [и др.] // М.: Металлургия, 1991. — 320 с.
4. Mittemeijer, E.J. The relation between residual macro- and microstresses and mechanical properties of case — hardened steels / Proc. Symp. 112th AIME, 1983. — Atlanta: Warrendale Pa, 1984. — Pp.161–187.
5. Алехин, В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В.П. Алехин. — М.: Наука, 1983. — 260 с.

6. Yoshioka, Y. Fatigue crack propagation and residual stresses in tufftrided steel / Y. Yoshioka // Proc. 2nd Int. Conf. M Behav. Mater., Boston, 1976. — Pp. 829–833.
7. Шашкой, Д.П. О роли водорода в охрупчивании азотированных сталей / Д.П. Шашкой, Д.В. Кочней, Ю.К. Коткон // Технология металлов. — 2003. — № 9. — С. 13–14.
8. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность: ГОСТ 21354-87. — Введ.: 01.01.1989. — Госстандарт СССР.
9. Справочник металлста: в 5 т. / под ред. С.А. Чернавского, В.Ф. Решикова. — 3-е изд., перераб. — М.: Машиностроение, 1976. — 768 с. — Т. 1.
10. Планетарные передачи: справ. / под ред. В.М. Кудрявцева и Ю.Н. Кирдяшева. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1977. — 535 с.
11. Thin Rims for Internal Gears / B. Eng. Benjamin Mahr // GearSolutions, October 2011. — Pp. 66–76.
12. VDI 2737: Calculation of the load capacity of the tooth root in internal toothings with influence of the gear rim. — VereinDeutscherIngenieure, 2005. — 72 p.
13. Влияние азотирования на остаточные напряжения и предел выносливости образцов с надрезами из стали 38Х2МЮА / В.С. Вакулюк [и др.] // Вест. СГАУ. — 2012. — № 5(36), ч. 1. — С. 89–94.
14. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упорочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичев [и др.] // Тр. МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». — Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. — С. 678–685.
15. Большая советская энциклопедия: в 30 т. / гл. ред. А.М. Прохоров. — 3-е изд. — М.: Сов. энцикл., 1969–1978. — Т. 17: Моршин—Никиш. — 1974.
16. 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. 71–74.
17. Харитончик, Д.И. Крупногабаритные зубчатые колеса с внутренним зацеплением из алюминийсодержащих сталей / Д.И. Харитончик, В.И. Моисеенко. — Минск: Беларус. наука, 2012. — 125 с.
18. Трошенко, В.Г. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ. / В.Г. Трошенко, Л.А. Сосновский. — Киев: Наук. думка, 1987. — Ч. 2. — 1330 с.
19. Способ термической обработки конструкционных легированных азотируемых сталей: пат. 16216 Респ. Беларусь от 30.08.2012 / Д.И. Харитончик [и др.] // Офиц. бюл. «Изобретения. Полезные модели. Промышленные образцы» / Нац. Центр интеллектуал. собственности. — 2012. — № 4. — С. 104.

HARITONCHIK Dmitriy I.
Deputy General Director in Quality¹

GALIN Anatoliy P.
Design Engineer I category¹

KARPOVICH Petr G.
Head of Motor-Wheels Design Bureau¹

KRIVONOS Artem N.
Junior Researcher²
E-mail: ks_oim@tut.by

MOISEENKO Vladimir I., Dr. Techn. Sc., Professor
Chief Researcher²

¹OJSC “BELAZ” — Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Republic of Belarus

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

Received 02 May 2016.

FATIGUE STRENGTH OF RIMS OF LARGE NITRIDED GEARS WITH INTERNAL GEARING

This work is devoted to analysis of a new method for the experimental evaluation of the fatigue resistance of rims of large nitrided gears with internal gears by testing their fragments (sectors) under cyclic lateral bending. The changes in cyclic strength of 38H2MJuA steel rims caused by nitriding and various modes of details heat treatment before nitriding are comparatively evaluated.

Keywords: gears, internal gearing, nitriding, fatigue strength, wheel rims, hardened layer, hardness of a rim

References

1. Terentev E.F., Kolmakov M.S., Michugina A.G. Ispol'zovanie azotirovaniya dlja izmeneniya mekhanicheskikh harakteristik metallicheskih materialov [Using nitriding to change the mechanical properties of metallic materials]. *Sb. statej po materialam I mezhdunar. konf. "Deformacija i razrushenie materiala"* [Proc. of the I International Conference “Deformation and fracture of materials”]. Moscow, IMET im. Bajkova RAN, 2006, pp. 457–463.
2. *Jenciklopedija po mashinostroeniju XXL, oborudovanie, materialovedenie, mehanika i ...* [Encyclopedia of Mechanical Engineering XXL, equipment, materials, mechanics ...]. Available at: <http://mash-xxl.info/info/127433/> (accessed 12 May 2016).

3. Lahtin Yu.M., Kogan Ya.D., Spies G.-I., Bohmer Z. *Teorija i tehnologija azotirovanija* [Theory and technology of nitriding]. Moscow, Metallurgy, 1991. 320 p.
4. Mittemeijer E.J. The relation between residual macro- and microstresses and mechanical properties of case-hardened steels. *Proc. Symp. 112nd AIME*. Atlanta, 1984, pp. 161–187.
5. Alehin V.P. *Fizika prochnosti i plastichnosti poverhnostnykh sloev materialov* [Physics of strength and plasticity of the surface layers of materials]. Moscow, Nauka, 1983. 260 p.
6. Yoshioka Y. Fatigue crack propagation and residual stresses in tuffitrid steel. *Proc. 2nd Int. Conf. Mech. Behav. Mater.*, Boston, Mass., 1976, pp. 829–833.
7. Shashkoy D.P., Kochney D.V., Kotkon Ju.K. O roli vodoroda v ohrupchivanii azotirovannykh stalej [On the role of hydrogen embrittlement nitrided steels]. *Tehnologija metallov* [Metal technology], 2003, no. 9, pp. 13–14.
8. GOST 21354–87. *Peredachi zubchatye cilindricheskie jevol'ventnye vneshnego zaceplenija. Raschet na prochnost* [State Standard 21354–87. Cylindrical involute external gears of external engagement. Strength calculation]. State Standard of the USSR, 1987.
9. Chernavskov S.A., Reshnikov V.F. *Spravochnik metallista* [Directory of metalworker]. Moscow, Mashinostroenie, 1976, vol. 1, 768 p.
10. Kudryavtsev V.N., Kiryashev Ju.N. *Planetarnye peredachi. Spravochnik* [Planetary transmission. Guide]. Leningrad, Mashinostroenie, 1977. 535 p.
11. Benjamin Mahr. *Thin Rims for Internal Gears. KISSsoft examines the effects of thin rims for internal gears and their consideration in the calculation of ISO and VDI standards*. GearSolutions, 2011, p. 66–76.
12. VDI 2737. *Calculation of the load capacity of the tooth root in internal toothings with influence of the gear rim*. VereinDeutscherIngenieure, 2005. 72 p.
13. Vakuljuk V.S., Chirkov A.V., Bukatjy A.S., Filippov A.A. Vlijanie azotirovanija na ostatochnye naprjazhenija i predel vynoslivosti obrazcov s nadrezami iz stali 38X2MЮA [Effect of nitriding on residual stress and fatigue strength of notched steel 38X2MЮA]. *Vestnik SGAU* [Bulletin of SSAU], 2012, no. 5(36), pp. 89–94.
14. Kirpichjov V.A., Filatov A.P., Karanaeva O.V., Chirkov A.V., Semjonova O.Ju. Prognozirovanie predela vynoslivosti poverhnostno uprochnjonnykh detalej pri razlichnoj stepeni koncentracii naprjazhenij [Prediction of fatigue strength of surface hardened components with varying degrees of stress concentration]. *Trudy MNTK "Prochnost' materialov i jelementov konstrukcij"* [Proceedings of the IRTC "Strength of materials and structural elements"]. Kiev, NAS of Ukraine, 2011, pp. 678–685.
15. Prohorov A.M. *Bol'shaja sovetskaja jenciklopedija* [The Great Soviet Encyclopedia]. Moscow, Sov. Jencikl., 1974, vol.17.
16. Kharitonchik D.I. Konstrukcionnaja prochnost aljuminijisoderzhashhih stalej v krupnogabaritnykh azotirovannykh zubchatykh kolesah s vnutrennim zacepleniem [Structural strength of aluminum-containing steels in constructions of large-dimension nitrided internal gears]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2012, no. 1, pp. 71–74.
17. Haritonchik D.I., Moiseenko V.I. Krupnogabaritnye zubchatye koljosa s vnutrennim zacepleniem iz aljuminijisoderzhashhih stalej [Large gears with internal gearing of the aluminum-containing steels]. Minsk, Belaruskaja navuka, 2012. 125 p.
18. Troschenko V.G., Sosnovskiy L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov. Spravochnik* [The resistance of metals and alloys fatigue. Directory]. Kiev, Naukova dumka, 1987. 1330 p.
19. Haritonchik D.I., Shkatulo N.D., Moiseenko V.I., Mariev P.L., Papkovskiy P.I. *Sposob termicheskoj obrabotki konstrukcionnykh legirovannykh azotiruemykh stalej* [The method of heat treatment of structural steels alloyed nitrided]. Patent BY, no. 16216, 2012.