

**Каплун П.В.,
Гончар В.А.**

Хмельницький національний університет,
г. Хмельницький, Україна
E-mail: roger_rgr@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ОТКРЫТЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

УДК 621.894:62-192

Приведены результаты исследований долговечности открытых зубчатых передач с применением прогрессивных технологий упрочнения поверхности методами ионного азотирования в безводородных насыщающих средах и последующей термообработки с созданием в поверхностном слое материала оптимальных остаточных напряжений сжатия.

Ключевые слова: ионное азотирование, износ, усталость, изгиб, зубчатое колесо, открытая передача.

Актуальность задачи

Зубчатые передачи имеют широкое применение в технике. Их долговечность и надежность часто определяют надежность и долговечность машин в целом. Опыт эксплуатации зубчатых колес свидетельствует, что подавляющее большинство выхода их из строя открытых зубчатых передач происходит в результате поломки зубьев от изгиба. В настоящее время существует много способов повышения износостойкости и долговечности зубчатых передач, но проблема не решена до конца и является актуальной.

Анализ литературы

Поверхностные слои в процессе эксплуатации открытых зубчатых колес разрушаются в результате циклического действия изгибающих напряжений и изнашивания от проскальзывания контактирующих поверхностей шестерни и колеса. Максимальные напряжения изгиба возникают в момент, когда вся нагрузка воспринимается одной парой зубцов, а точка ее приложения находится в положении, наиболее удаленном от корня зуба. При этом максимальные напряжения изгиба концентрируются в основе зуба и в зоне выкружки возникает концентрация напряжений (рис.1). Для прямозубых зубчатых колес коробок передач максимальные напряжения изгиба достигают 850 МПа [2], а для цементированных тяжело нагруженных зубчатых колес – до 2500 МПа [1]. Превышение фактическими напряжениями изгиба допустимых напряжений вызывает поломки зубьев.

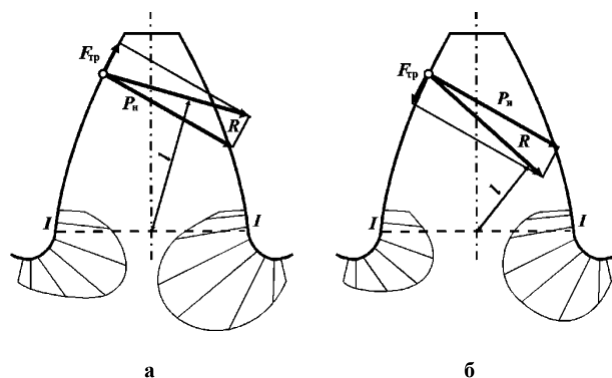


Рис. 1 – Плечо приложения равнодействующей силы R от действия нормальной силы P_n и силы трения $F_{тр}$ для ведущего (а) и ведомого (б) зубьев в опасном сечении

В зубчатых парах совместное качение происходит лишь в полюсе. Поскольку направление перемещений контактных линий шестерни и колеса противоположные, то между ними происходит проскальзывание. Скорость скольжения равна разности скоростей качения шестерни и колеса, и увеличивается с увеличением передаточного числа. Проскальзывание поверхностей контактирующих зубьев вызывает трение в зоне контакта и износ материала.

Одним из самых нагруженных участков профиля зубчатого колеса является переходная зона от эвольвентного участка до впадины. В этой зоне происходит ударный вход зуба в зацепление. Исследованиями [5] показано, что свойства материала во впадине между зубьями определяют не только прочность зубьев при изгибе, но и в значительной степени влияют на контактную прочность поверхности зубьев. Напряженность в зоне контакта можно уменьшить, если материал во впадине между зубьями будет более прочным. От свойств материала в сердцевине зуба (впадине между зубьями) зависят износостойкость и долговечность зубчатой передачи. В связи с этим одним из перспективных направлений повышения и

стабилизации свойств зубчатых колес является применение таких селективных методов упрочнения, которые позволяют повысить физико-механические свойства по всей конфигурации зуба, обеспечив ее равнопрочность, износостойкость и контактную выносливость.

Таким образом, анализ условий эксплуатации зубчатых колес показывает, что долговечность работы зубчатых передач в значительной степени зависит от детального изучения условий работы зацепления, характера напряженно-деформированного состояния различных зон зубчатых колес и правильного подбора материалов и методов укрепления этих зон в соответствии с величиной и характером напряженного состояния.

Многих авторов [1 - 5] показывают, что максимальные напряжения при контактных нагрузках и изгибе возникают в поверхностных слоях, что приводит к возникновению микротрещин и разрушению как поверхности, так и конструкции в целом в результате развития и распространения микротрещин с поверхности в сердцевину (рис. 2). Поэтому для повышения износостойкости и долговечности конструктивных элементов и, в частности зубчатых колес, следует укреплять как поверхность, так и сердцевину, но с различными физико-механическими характеристиками – большими на поверхности и меньше в сердцевине. То есть, конструкция упрочненных слоев должна иметь градиентную структуру в соответствии с напряженно-деформированного состояния, возникающего в детали.

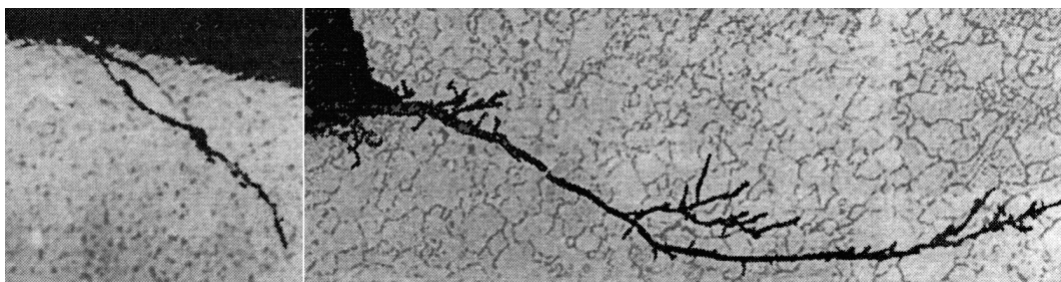


Рис. 2 – Зарождение и развитие микротрещин в поверхностном слое зубчатого колеса, x500

В настоящее время для укрепления зубчатых передач широко применяются цементация и нитроцементация мало углеродистых сталей с последующей термической обработкой материала, обеспечивающего значительное увеличение их износостойкости и долговечности. Однако эти технологии проводятся в средах, содержащих большое количество водорода, который вредно влияет на прочность сталей.

Согласно современным представлениям [6 - 9] водород длительное время может находиться в стали в виде ионов (протонов) и молекул. Небольшое количество водорода в стали не вызывает заметных изменений её свойств. Повышение концентрации водорода в стали выше некоего предела, зависящего от качества стали, изменяет её физические и механические свойства и может вызвать появление дефектов, влияющих на прочность. Водород в стали меняет её механические свойства при кратковременном и длительном статическом нагружении, а также при повторно-переменном и ударном воздействии [6 - 9].

Среди разнообразных проявлений воздействия водорода на механические свойства металлов, особое место занимает его влияние на трещиностойкость. Дефекты совершенно безопасные в обычных условиях в результате воздействия водорода могут стать опасными и привести к неожиданному хрупкому разрушению изделия [6]. В рамках дислокационно-декогезионной концепции Трояно-Ориони постулируют в металл водород прежде всего заполняет наиболее выгодные с энергетической точки зрения места – ядра дислокаций. В них концентрация водорода может достигнуть больших значений. При этом происходит ослабление когезии в ядре трещинообразующей дислокации, т.е. уменьшение силы сцепления, которая теперь является функцией количества водорода в зоне ядра дислокации или сверхдислокации за счет изменения электронной структуры металла, кластерообразования и образования связей металл-водород гидридного типа. Суммарный эффект этих трёх действий и представляет собой основной механизм декогезионного воздействия водорода на решетку металла.

Перспективной технологией упрочнения поверхности материалов является ионное азотирование в безводородных насыщающих средах (смесях азота с аргонном) [10], применение которой исключает вредное влияние водорода на металл.

Нами проведены экспериментальные исследования многоциклового усталости образцов из различных сталей, азотированных в водородсодержащих и безводородных насыщающих средах, при нагружении изгибом и износостойкости образцов при трении скольжения, которое имеет место в зубчатых передачах при качении с проскальзыванием.

Методика и результаты исследований

Исследования на многоцикловую усталость при изгибе проводились на гладких цилиндрических образцах диаметром 5 мм на машине ИМА-5 при чистом изгибе с вращением (частота 50 Гц), в среде

3%-ного раствора NaCl и в воздухе. Образцы изготавливались из Стали 45, часть из которых подвергалась ионному азотированию в водородсодержащей (60 об. % N_2 + 40 об. % H_2) и безводородной (60 об. % N_2 + 40 об. % Ar) средах при постоянстве остальных технологических параметров ($T = 540$ °C, $p = 80$ Па, $\tau = 240$ мин).

Результаты этих исследований приведены на рис. 3 и показывают, что предел выносливости образцов, подвергавшихся предварительно ионному азотированию в безводородной среде, при испытаниях на воздухе повысился в 1,9 раза (с 190 до 370 МПа), а при испытаниях в 3% - ном растворе NaCl в 3,6 раза (с 30 до 110 МПа) по сравнению с аналогичными значениями для не азотированных образцов. Предел выносливости образцов, азотированных в водородсодержащей среде (кривая 3) при испытаниях в 3%-ном растворе NaCl на 25 % ниже по сравнению с образцами, азотированными по аналогичному режиму в безводородной среде. Причиной снижения предела выносливости является вредное влияние водорода, вызывающее декогезию кристаллической решетки металла, взаимодействие атомов водорода в металле с дислокациями, давлением молекулярного водорода в микрополостях стали, химическое взаимодействие водорода с компонентами сплава и выделением водородсодержащих фаз [6 - 9].

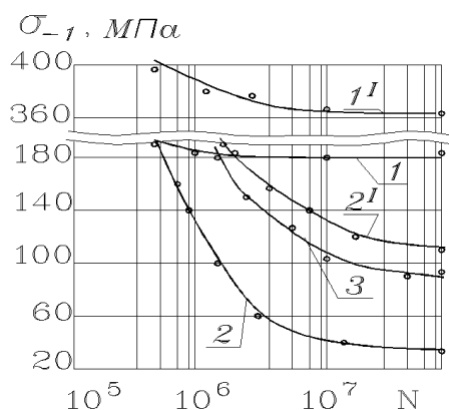


Рис. 3 – Кривые усталости в воздухе (1 и 1'), в 3% растворе NaCl (2, 2', 3) стали 20 при испытаниях на чистый изгиб цилиндрических образцов без химико-термической обработки (1 и 2), азотированных в тлеющем разряде в безводородной (60 об. % N_2 + 40 об. % Ar) среде (1' и 2') и водородсодержащей (60 об. % N_2 + 40 об. % H_2) среде (3) при постоянстве остальных технологических параметров

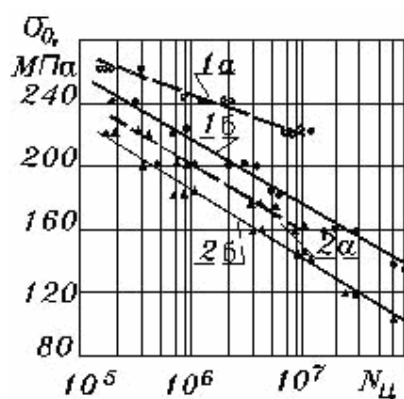


Рис. 4 – Многоцикловая долговечность плоских образцов с надрезом из стали 45X:
1 – азотированных ($T = 570$ °C, $p = 265$ Па, $\tau = 240$ мин, среда 75 об. % N_2 + 25 об. % Ar);
2 – улучшенных;
а – в воздухе;
б – в кислой среде (pH 6,5)

Испытания на многоцикловую усталость с концентратором напряжений проводилось на плоских образцах из стали 45X на стенде с электромагнитным возбуждением ЭДС-200 при консольном изгибе образца в одной плоскости и резонансе по первой форме колебаний [11]. Концентратор напряжений (нарезанная до упрочнения канавка глубиной 1 мм с углом раскрытия 60° и радиусом при вершине 0,2 мм) имел эффективный коэффициент концентрации, рассчитанный по Нейберу, равный 3,22. Испытания проводились на воздухе и в кислой среде (буферный раствор лимонной кислоты 5 г/л и двухзамещенного фосфорнокислого натрия 10 г/л) pH 6,5 при частоте нагружения 350 ... 400 Гц. За базу испытаний на воздухе и в кислой среде были приняты соответственно 10^7 и $5 \cdot 10^7$ циклов нагружений. Исследования прекращались при достижении длины трещины 0,5 мм, которая фиксировалась микроскопом МБС-1 (x88).

Как показали испытания (рис. 4) предел выносливости образцов из стали 45X в результате ионного азотирования в безводородной среде повысился на 37% при испытаниях на воздухе и на 31% при испытаниях в кислой среде.

Значительное повышение многоцикловой усталости образцов после ионного азотирования обусловлено не только за счет образования нитридных фаз на поверхности металла, но и за счет возникновения в азотированных слоях остаточных напряжений сжатия. Величина напряжений сжатия при ионном азотировании достигает 800 МПа [12] и может изменяться в широких пределах с помощью изменения технологических параметров процесса диффузионного насыщения максимальный эффект от остаточных напряжений сжатия достигается при их оптимальном значении.

Исследование контактной выносливости сталей проводилось на специальной установке трения качения [13], что монтировалась на базе станка с вертикальным шпинделем. В установке по круговой дорожке плоских образцов перекатывались шарики с коэффициентом проскальзывания 0,4% или цилиндрические ролики с коэффициентом проскальзывания 17,6% при различных нагрузках на тела качения и частоте вращения шпинделя 900 мин^{-1} . Исследовались образцы из различных сталей после ионного азотирования в водородных и безводородных средах с различной термической обработкой.

Результаты сравнительных исследований износостойкости и контактной выносливости образцов приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что контактная выносливость образцов после ионного азотирования в безводородной среде в 1,4 - 1,5 раз больше по сравнению с не азотированными образцами и на 14 - 25 % выше по сравнению с азотированием в водородной среде. Снижение контактной выносливости образцов азотированных в водородной среде, объясняется вредным воздействием водорода на металл. Образцы из стали 45 после закалки и последующего азотирования имели на порядок выше контактную выносливость и износостойкость по сравнению с не закаленными образцами, что объясняется высокой твердостью основы, на которую опирался азотированный слой. При малой жесткости основы покрытие, имеющее более высокую твердость, быстро разрушается в связи с большой пластической деформацией основания. При этом резко увеличивается величина суммарного износа, что наглядно видно из табл. 1.

Таблица 1

Физико - механические и трибологические характеристики образцов после ионного азотирования и термической обработки и их долговечность при испытаниях на трение качения в смазке I-20, нагрузка на шарик 150 Н (контактное давление $p_0 = 3180$ МПа)

№ п/п	Марка стали	Вид термообработки и технологии	Микротвердость H_{100} , МПа			Толщина покрытия, мкм	Интенсивность износа, $1 \cdot 10^{-11}$	Долговечность до появления пitting, $\cdot 10^6$ циклов
			поверхности	основы	дорожки качения после испытания			
1	20X13	без термообработки	2550	2370	3460	-	620	0,58
2	20X13	ионное азотирование в среде 60%Ar + 40% N ₂	7380	2370	3650	260	570	0,88
3	45	без термообработки	3200	2450	3290	-	600	0,60
4	45	ионное азотирование в среде 60%Ar + 40% N ₂	7440	2450	4100	280	452	0,96
5	45	закалка	5100	5100	5230	-	21,2	9,1
6	45	Закалка + ионное азотирование в среде 60%Ar + 40% N ₂	7460	4400	7200	290	16,1	12,9
7	45	ионное азотирование в среде 60%Ar + 40% H ₂	8420	2450	4050	290	440	0,75
8	45	закалка ионное азотирование в среде + 60%Ar + 40% H ₂	В560	4410	8210	300	15,4	11,2
9	20X13	ионное азотирование в среде 60%Ar + 40% H ₂	7640	2370	3670	280	580	0,70

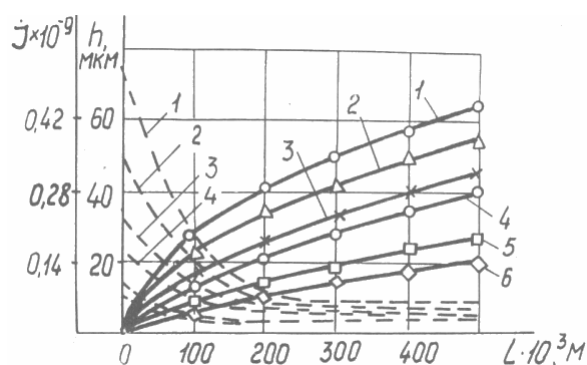


Рис. 5 – Кинетика изнашивания стали 45X в масле I-20 при удельной нагрузке 4 МПа и скорости скольжения 1 м/с:
 1 – сталь улучшенная; 2, 3, 4 – сталь азотированная (100% N₂, $p = 265$ Па, $\tau = 4$ ч) при температурах 520 °С, 560 °С и 600 °С соответственно;
 5, 6 – сталь азотированная ($T = 560$ °С, 75 об. % N₂ + 25 об. % Ar, $\tau = 4$ ч) при давлении газовой среды 450 и 80 Па соответственно

Суммарный износ при качении с проскальзыванием включает пластическую деформацию поверхности контакта износ от трения скольжения при проскальзывании. В первоначальный период в суммарной величине износа пластическая деформация занимает преобладающую долю и резко возрастает с увеличением нагрузки на тела качения. В процессе исследований износ от проскальзывания шариков был незначительным в связи малым коэффициентом проскальзывания (0,4 %). При применении в качестве

тел качения цилиндрических роликов коэффициент проскальзывания составлял 17,7 % и износ до начала возникновения питтинга был преобладающим по сравнению с пластической деформацией поверхностного слоя. В открытых зубчатых передачах износ от проскальзывания еще больше в связи попадания пыли и другого абразива в зону трения. Износ при этом за период эксплуатации достигает сотни или тысячи микрометров и зубчатые колеса выходят из строя не от образования питтинга, а от износа и усталостного разрушения зубцов при изгибе.

Эффективным средством для уменьшения износа поверхностей трения при скольжении является ионное азотирование по оптимальному режиму с учетом условий эксплуатации.

На рис. 5 приведены кривые изменения износа и интенсивности изнашивания стали 45X в масле И-20 в зависимости от пути трения. Изменение технологических параметров ионного азотирования позволяет выбрать такой режим упрочнения, который существенно снижает интенсивность изнашивания стали. Так интенсивность изнашивания стали 45X после ионного азотирования по режимам 5 и 6 уменьшилась более чем в 3 раза по сравнению с интенсивностью изнашивания улучшенной стали.

Выводы и рекомендации

Анализ условий эксплуатации и напряженно-деформированного состояния зубьев открытых зубчатых передач показали, что разные участки поверхности зубьев принимают различные по величине и виду напряжения. Наиболее опасными участками поверхности есть ножка и впадина между зубцами. Поэтому очевидно, что для этих участков поверхности необходимы различные свойства поверхностного слоя и остаточные напряжения сжатия, обеспечивающие максимальную износостойкость и долговечность зубчатых колес. Достичь данной цели можно за счет упрочнения поверхности зубьев и в первую очередь на опасных участках за счет нанесения упрочняющих покрытий с градиентной структурой по глубине, создание в поверхностных слоях остаточных напряжений сжатия с оптимальным значением и упрочнение сердцевины зуба. Для этого следует использовать термическую обработку материала зуба с повышением твердости его сердцевины, наносить упрочняющие покрытия с применением ионного азотирования в безводородных средах по оптимальным технологическим режимам с учетом условий эксплуатации.

Литература

1. Александров В.И. Материалы зубчатых колес грузовых автомобилей / В.И. Александров, А.С. Соболев // Минск: АНБССР Институт проблем надежности и долговечности машин, 1978. 58с.
2. Дымшиц И.И. Коробки передач. М. Машгиз, 1960. 360с.
3. Трубин Г.К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес. М. Машгиз, 1962, 404с.
4. Копф И.А. Нестационарная термическая модель заедания и износа эвольвентных зубчатых передач / И.А. Копф, В.В. Корнилов, Е.В. Ефимов // Техника машиностроения. 1998, №1(15) с. 54-59.
5. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303с.
6. Механика разрушения и прочность металлов: Справочное пособие: В 4 т./ Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988.– Т. I: Основы механики разрушения / В.В. Панасюк, А. А. Андрейков, В.З. Партон – 1988. – 488 с.
7. Калачев В.А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985.– 217 с
8. Водород в металлах/ Под ред. Г.Альфельда и И.Фелькля. – М.: Мир, 1981.– Т. 2– 430с.
9. Карпенко Г.В. Влияние водорода на свойства стали / Г.В. Карпенко, Р.И. Крипякевич // – М.: Металлургиздат, 1962. – 198/.
10. Каплун В.Г. Енерго і ресурсозберігаюча екологічна чиста технологія та обладнання для зміцнення деталей машин / В.Г. Каплун, І.М. Пастух // Машинознавство, № 2. – 2002. – с.49-51.
11. Прокопенко Р.В. Методика испытаний компрессорных лопаток ГТД на усталость в коррозионной среде / Р.В. Прокопенко, В.Н. Торгов // Проблемы прочности. №4, 1980. – С.107-109.
12. Каплун В.Г. Исследование остаточных напряжений в стали 45X после ионного азотирования. Лазерная, термическая и химико-термическая обработка в машиностроении. Сб. науч. тр. / В.Г. Каплун, А.Е. Рудык //– М.: МАДИ, 1987. – С.109-112.
13. Каплун П.В. Кинетика износа сталей с диффузионными покрытиями при контактном циклическом нагружении. //Журнал "Проблемы трибологии". – Хмельницький, -2001, -№1. С. 199-124.

Поступила в редакцію 03.06.2015

Kaplun P.V., Gonchar V.A. Effect on durability ion nitriding open gears.

The results of researches of durability open gears using advanced technologies of surface hardening by ion nitriding in hydrogen-saturating media and subsequent heat treatment with the creation of the material in the surface layer of optimum residual compressive stresses.

An analysis of the operating conditions and the stress-strain state of open gear teeth showed that different portions of the surface of teeth takes different in magnitude and type of stress. The most dangerous areas of the surface have a leg and depression between the teeth. Therefore, it is obvious that these surface portions require different properties of the surface layer and the residual compressive stress to provide maximum wear and durability of the gears. To achieve this goal can be achieved by hardening the surface of the teeth and especially in hazardous areas by applying strengthening coatings with a gradient structure in depth, creating in the surface layers of the residual compressive stresses to the optimum value and hardening the core of the tooth. To do this, use a heat treatment of the tooth material with increased hardness of its core strengthening coatings applied using ion nitriding in hydrogen-free environment for optimum technological modes based on operating conditions.

Key words: ion nitriding, wear, fatigue, bending, gear, outdoor gear.

References

1. Aleksandrov V.I., Sobolev A.S. Materialy zubchatyh koles gruzovyh avtomobilej. Minsk: ANBSSR Institut problem nadezhnosti i dolgovechnosti mashin, 1978. 58s.
2. Dymshic I.I. Korobki peredach. M. Mashgiz, 1960. 360s.
3. Trubin G.K. Kontaktnaja ustalost' materialov dlja zubchatyh koles. M. Mashgiz, 1962, 404s.
4. Kopf I.A., Kornilov V.V., Efimov E.V. Nestacionarnaja termicheskaja model' zaedanija i iznosa jevol'ventnyh zubchatyh peredach. Tehnika mashinostroenija. 1998, №1(15), s. 54-59.
5. Zinchenko V.M. Inzhenerija poverhnosti zubchatyh koles metodami himiko-termicheskoy obrabotki. M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Bauman, 2001. 303s.
6. Mehanika razrushenija i prochnost' metallov: Spravochnoe posobie: V 4 t. Pod obshh. red. V.V. Panasjuka. Kiev: Nauk. dumka, 1988. T. I: Osnovy mehaniki razrushenija. V.V. Panasjuk, A. A. Andrejkov, V.Z. Parton. 1988. 488 s.
7. Kalachev V.A. Vodorodnaja hrupkost' metallov. M.: Metallurgija, 1985. 217 s
8. Vodorod v metallah. Pod red. G.A.l'fel'da i I.Fel'klja. M.: Mir, 1981. T. 2 430 s.
9. Karpenko G.V. Kripjakevich R.I. Vlijanie vodoroda na svojstva stali. M.: Metallurgizdat, 1962. 198.
10. Kaplun V.G. Pastuh I.M. Energo i resursozberigajucha ekologichna chista tehnologija ta obladnannya dlja zmichennja detalej mashin. Mashinoznavstvo, № 2. 2002. s.49-51.
11. Prokopenko R.V., Torgov V.N. Metodika ispytanij kompressornyh lopatok GTD na ustalost' v korrozionnoj srede. Problemy prochnosti. №4, 1980. S.107-109.
12. Kaplun V.G. Issledovanie ostatochnyh naprjazhenij v stali 45H posle ionnogo azotirovanija. Lazer-naja, termicheskaja i himiko-termicheskaja obrabotka v mashinostroenii. Sb. nauch. tr. V.G. Kaplun, A.E. Rudyk. M.: MADI, 1987. S.109-112.
13. Kaplun P.V. Kinetika iznosa stalej s diffuzionnymi pokrytjiami pri kontaktnom ciklicheskom nagrazhenii. Zhurnal "Problemi tribologii". Hmel'nic'kij, 2001, №1. S.199-124.