

Мальцев Т.В.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени П. Василенко,
г. Харьков, Украина,
E-mail: taras.maltsev@gmail.com

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРШНЕВЫХ КОЛЬЦАХ

УДК 621.793

Представлен способ оценки и контроля степени неоднородности напряженно-деформированного состояния маслосъемных поршневых колец тепловозного дизель-генератора Д100 по коэрцитивной силе и изменению линейного размера замка до- и после упрочнения ионно-плазменным покрытием. Проведена оценка напряжений оптико-математическим методом после предварительных проведенных стендовых испытаний на трение и изнашивание.

Ключевые слова: поршневое кольцо, коэрцитивная сила, размер замка, ионно-плазменное покрытие, оптико-математический метод, трение и износ.

Постановка проблемы. Во время эксплуатации большинство деталей оборудования, узлов и агрегатов подвержены интенсивному механическому изнашиванию, что существенно снижает их долговечность. Ярким тому примером являются маслосъемные поршневые кольца тепловозных дизельных двигателей модели Д100, которые по серийной технологии изготавливают из серого чугуна без дальнейшего нанесения износостойких покрытий.

Одним из наиболее перспективных способов повышения стойкости к износу таких изделий является нанесение высокоэффективных ионно-плазменных покрытий. Однако, в силу возможного возникновения и развития остаточных напряжений в кольце во время нанесения покрытия, возникает необходимость в проверке состояния изделия и разработке специального метода оценки и контроля.

Анализ публикаций. Среди большого количества методов неразрушающего контроля, для оценки уровня напряжений широкое применение получил магнитный способ по коэрцитивной силе [1–3], который отличается высокой структурно-чувствительной характеристикой. При этом, в поршневых кольцах следует оценивать как изменения уровня коэрцитивной силы в различных зонах, так и линейные размеры его замка, изменяющиеся после осаждения покрытия, для оценки степени напряжений таких изделий.

Кроме того, представляет интерес исследовать исходные поверхности и зоны трения таких колец при помощи прогрессивного оптико-математического метода моделирования. Такой метод позволяет обнаружить зависимости между параметрами эксплуатации, и образованной в результате структуры контактирующих поверхностей изделий, которая оценивается по аппроксимации цифровых изображений изделий. К тому же, данный способ позволяет оценить степень и характер формируемых напряжений и локально определить зону их концентрации [4 – 8].

Целью исследований является разработка неразрушающего метода оценки и контроля уровня остаточных напряжений маслосъемных поршневых колец до эксплуатации, сопоставительно с оптико-математическим методом оценки напряжений после предварительных проведенных испытаний на трение и износ

Материалы исследований. В качестве примера, была выполнена оценка уровня напряженности партии маслосъемных поршневых колец дизельного двигателя Д100 после нанесения многослойного ионно-плазменного покрытия TiN/CrN общей толщиной 1,7 мкм. Для сравнения, было выполнено измерение коэрцитивной силы

поршневых колец, изготавливаемых по серийной технологии. Измерения производили коэрцитиметром модели КРМ-Ц-2М с использованием специального высокочувствительного преобразователя. Дополнительно проводили измерения микротвердости колец на микротвердомере ПМТ-3, а также измерения высоты рабочего пояса кольца на инструментальном микроскопе ИМЦ-50.

Методика исследований. Измерения величины замка и уровня остаточных напряжений проводили на протяжении 1,5 месяцев с периодичностью оценки 7-9 дней. Зоны измерений различных партий чугунных поршневых колец (серый чугун) представлены на рис. 1 (зоны: I, II и III). Степень неоднородности напряженно-деформированного состояния кольца, по коэрцитивной силе, оценивали сопоставительно до- и после осаждения пленки.

Дополнительно были проведены стендовые испытания обоих вариантов колец на специализированной возвратно-поступательной машине трения с целью оценки степени напряжений после эксплуатации. В качестве контртела, были использованы образцы гильзы цилиндров, изготовленные из серого чугуна марки СЧ ХНМР и подвергнуты фосфатированию (серийная технология). Общая база испытаний составила 100 ч. Неизменная скорость скольжения составила 1,3 м/с. Удельное давление одного рабочего пояса кольца составила 0,8 МПа (0,2 МПа давление при эксплуатации). Это позволило получить моделирующий процесс изнашивания за более короткий период испытаний. Длина рабочего хода образца гильзы цилиндров – 100 мм. Подачу моторного масла марки М14-В₂ осуществляли с помощью игольчатого клапана, и она составляла 1-2 капли в минуту. Общая длина пройденного пути трения образцов – 468 км.

После испытаний, была выполнена оптико-математическая оценка остаточных напряжений по цифровым изображениям маслосъемных поршневых колец. Для этого была создана специальная компьютерная программа, которая выводит на экран точки, лежащие в интервалах относительной нейтральности, лапласианов и дивергенций. После пересчета электронных микроскопических фотографий металла зоны трения испытанных колец, программа формирует массив изображений (рис. 2, 3). В верхнем его левом углу рисунок фотографии структуры. Затем слева направо в верхнем ряду рисунки точек структуры, относящихся к следующим интервалам гистограммы нейтральности абсолютной величины лапласиана:

0-1/9, 1/9-2/9, 2/9-3/9, 3/9-4/9.

Во втором ряду сверху продолжение рисунков, относящихся к нейтральности абсолютной величины лапласиана:

4/9-5/9, 5/9-6/9, 7/9-8/9, 8/9-1.

В левом углу третьего ряда сверху всегда пустое место. Затем слева направо в этом же третьем ряду рисунки точек структуры, относящихся к следующим интервалам гистограммы нейтральности абсолютной величины дивергенции:

0-1/9, 1/9-2/9, 2/9-3/9, 3/9-4/9.

В четвертом ряду сверху продолжение рисунков, относящихся к нейтральности абсолютной величины дивергенции:

4/9-5/9, 5/9-6/9, 7/9-8/9, 8/9-1.

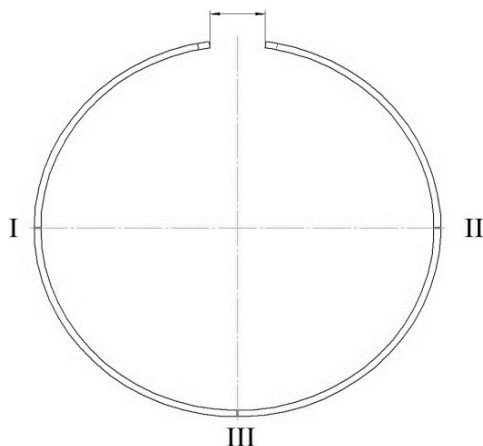


Рис. 1 – Зони измерений коэрцитивной силы и линейного размера замка поршневого кольца

Результаты исследований. Анализом было установлено, что после нанесения покрытия может варьироваться размер замка и формироваться остаточные напряжения в измеряемых зонах (рис. 1). В табл. 1 приведены величины замков до нанесения упрочняющего покрытия, а также первый и последний измерения после напыления за весь период наблюдений. В табл. 2 отображены показания коэрцитивной силы первого и последнего измерений в трех зонах после напыления.

Таблица 1

Линейные размеры замков до и после нанесения покрытия

Номер поршневого кольца	До нанесения покрытия, мм	После нанесения покрытия, мм (1-е измерение)	После нанесения покрытия, мм (последнее измерение)
1	31	30	30
2	27	27	27
3	24	29	28

Таблица 2

Показатели коэрцитивной силы в трех зонах измерений после нанесения покрытия

Номер поршневого кольца	После нанесения покрытия, А/см (1-е измерение)				После нанесения покрытия, А/см (последнее измерение)			
	I	II	III	Сред. значение	I	II	III	Сред. значение
1	11,9	11,8	12,2	11,97	11,5	11,4	11,8	11,57
2	16,9	16,9	19,3	17,7	16,4	16,3	19,0	17,23
3	14,8	14,0	14,2	14,3	14,0	13,9	13,5	13,8

До нанесения покрытий, коэрцитивная сила была сопоставима с уровнем коэрцитивной силы после напыления (последнее измерение), но отличалась уровнем показаний различных поршневых колец.

Результаты измерений (табл. 1) показали, что после напыления величина замка в кольце № 1 уменьшилась на 3,2%, а в № 3 увеличилась на 17,24%. Последнее измерение зазора замка, по окончании проведения эксперимента, в кольце № 3 показало, что оно уменьшилось на 3,45%, что соответствует требованиям как по чертежу, так и степени релаксации напряжений. В кольце № 2 размер замка остался неизменным за весь период наблюдений.

Результаты измерений (табл. 2) показали, что в результате естественного старения

(вылеживания) уровень остаточных напряжений снизился, в среднем, на 3,34%, 2,65% и 3,5% для колец № 1, № 2 и № 3 соответственно, что свидетельствует об эффективности предлагаемой технологии релаксации напряжений таких изделий после их упрочнения.

Дополнительно было выполнено измерение коэрцитивной силы маслоъемных поршневых колец, изготавливаемых по серийной технологии, которая предусматривает нанесение покрытия олова, необходимое для ускоренной приработки изделия. Уровень напряжений таких колец сопоставим с кольцами, упрочненными ионно-плазменным покрытием (табл. 3). Однако, если сравнить среднее значение напряжений по всем кольцам как серийных, так и с ионно-плазменным покрытием, то можно увидеть, что коэрцитивная сила упрочненных колец, после естественного старения, на 10,8 % ниже от серийных. Это также подтверждает, что существенного влияния на уровень напряженности примененная технология нанесения упрочняющего покрытия не имеет. Такое низкое влияние нанесения покрытия на уровень напряжений в кольце объясняется низкой чувствительностью базового материала к концентраторам напряжений из-за наличия графитовых включений [9]. Это и позволяет обеспечивать повышение износостойкости таких изделий без потери в долговечности по степени напряженно-деформированного состояния.

Таблица 3

Коэрцитивная сила серийных поршневых колец в трех зонах измерений

Условные номера серийных поршневых колец	Без упрочняющего покрытия, А/см			
	I	II	III	Сред. значение
1	18,9	17,2	18,7	18,27
2	14,8	14,5	15,2	14,83

После аппроксимации изображений общего вида колец двух вариантов получили следующее. Оказалось, что рисунки точек, принадлежащих одному и тому же интервалу относительной нейтральности, имеют горизонтальные (перпендикулярно направлению скольжения) белые полосы. Эти полосы зависят от того, в каких именно ячейках происходит подсчет нейтральности. Сами полосы напоминают ударные волны [10, 11], которые выявлены на поверхностях колец (рис. 2, 3). Не исключено, что такие полосы связаны с напряжениями сжатия и растяжения.

Таблица 4

Микротвердость образцов серийных и упрочненных маслоъемных поршневых колец

Вариант кольца	Микротвердость исходная, Н-50, кг/мм ²	Микротвердость после стендовых испытаний, Н-50, кг/мм ²
Серийное	39	426
Упрочненное	5582	720

Таблица 5

Увеличение высоты рабочих кромок серийных и упрочненных колец после испытаний

Вариант кольца	Увеличение высоты рабочего пояса кольца на, мм	Скорости скольжения, м/с
Серийное	0,04	1,3
Серийное	0,04	
Упрочненное	0,01	1,3
Упрочненное	0,01	

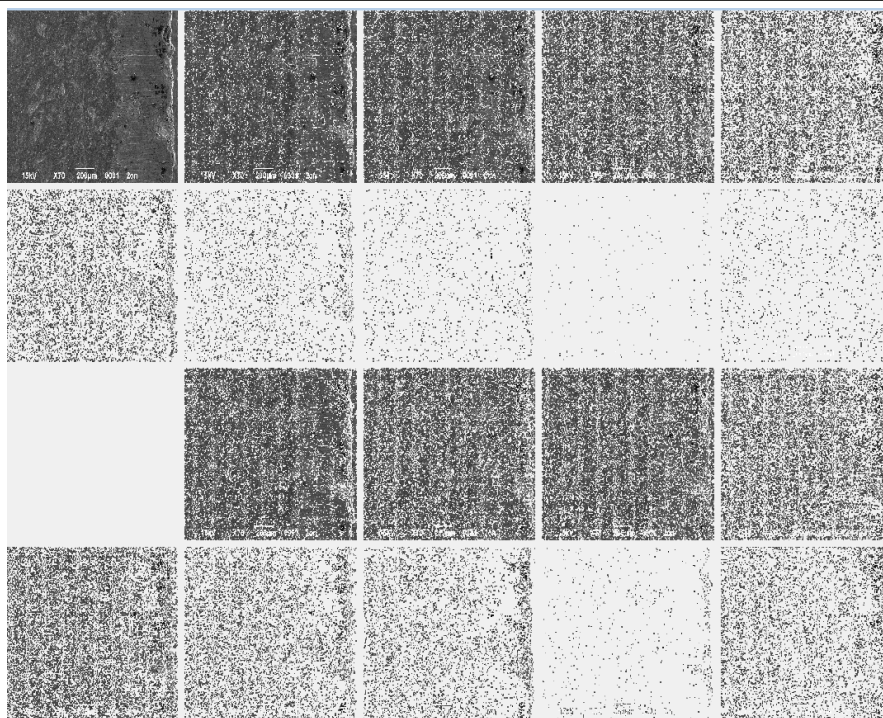


Рис. 2 – Фотографія общего вида кольца с ионно-плазменным покрытием (ячейки 2×2)

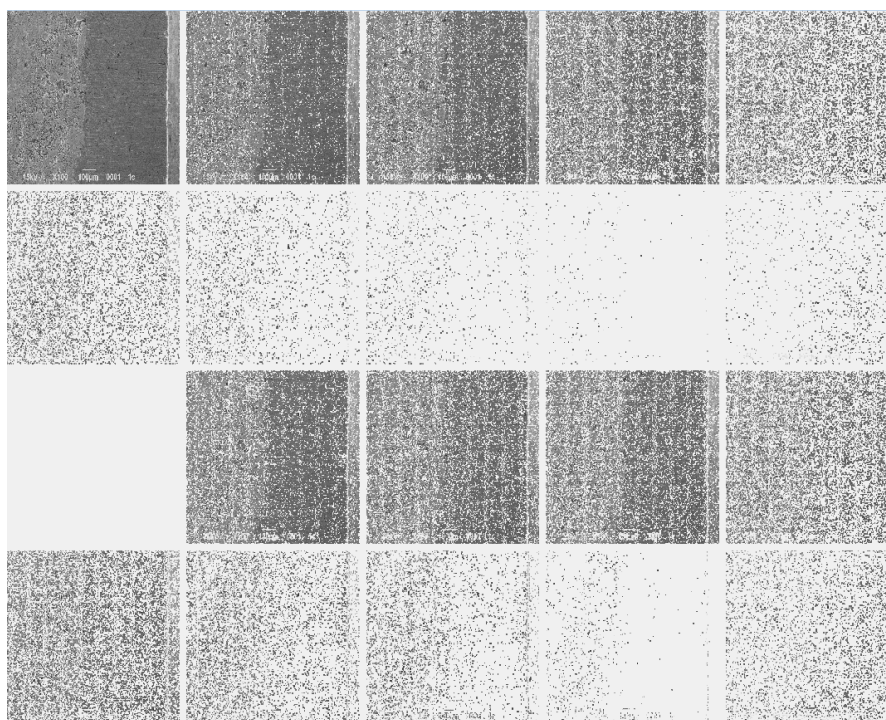


Рис. 3 – Фотографія общего вида серийного кольца (ячейки 2×2)

На рис. 2, 3 полосы сжатия и растяжения, при подсчете в ячейках 2x2, расположены как непосредственно в области трения, так и на примыкающей исходной поверхности, где левая область изображения – исходная поверхность, а правая – зона трения. Такое распределение напряжений вполне объяснимо работой принципа Сен-Венана [12, 13]. Период чередования полос серийных и упрочненных колец сопоставим, и составляет ~ 86 мкм, а средняя ширина полос отличается, так для серийного кольца она составляет ~ 43 мкм, а для упрочненного ~ 63 мкм. Можно заметить, что полосы кольца с ионно-

плазменним покриттям более широкие и контрастные. Более широкие полосы характеризуют формирование более высоких напряжений вследствие трения. Однако, это также может быть обусловлено высокой степенью сопротивления изнашиванию, что подтверждается высоким уровнем исходной и послеэксплуатационной микротвердости (табл. 4), и увеличенной высотой рабочего пояса серийных колец, который в 4 раза выше чем у упрочненных (табл. 5). Схожий период чередования полос, в свою очередь показывает, что условия эксплуатации идентичные: скорость скольжения, удельное давление на рабочий пояс кольца, характер движения. Идентичная периодичность, в таком случае, свидетельствует о том, при низком уровне исходных напряжений, оцененных по коэрцитивной силе в упрочненных, относительно серийных колец, технология ионно-плазменного осаждения покрытия позволяет предотвратить развитие напряжений и, как следствие, деградацию поверхности трения, с одновременным повышением износостойкости (табл. 5).

Выводы. Упрочненные поршневые кольца 1 – 3 отличаются периодом производства (материалом, его структурой). Для восстановления размера замка и снижение уровня напряжений рекомендуется проводить естественное старение (вылеживание) изделий в течение 1,0 - 1,5 месяцев. При этом, измерения размера замков и величины коэрцитивной силы следует проводить с периодичностью 7-9 дней. Однако, в случае повышения напряженно-деформированного состояния (более 5 %) по размеру замка и/или величины коэрцитивной силы (табл. 1, кольцо № 3) после напыления, рекомендуется проводить дополнительную термообработку таких изделий путем низкотемпературного отпуска для дальнейшего их эффективного использования в эксплуатации. После проведенных стендовых испытаний тепловозных маслосъемных поршневых колец, при помощи оптико-математического метода моделирования, выявлены определенные закономерности структуризации исходных поверхностей и зон трения.

Обнаруженные оптико-математическим методом широкие чередующиеся горизонтальные полосы в кольце при нанесении ионно-плазменного покрытия, отвечающие за сопротивление деформации, обеспечивают существенное повышение износостойкости.

Предложенный комплексный метод оценки качества упрочненных поршневых колец позволяет надежно контролировать состояние после упрочнения и осуществлять рекомендации по корректировке потребительских свойств для эффективной эксплуатации. Разработанный способ защищен патентом Украины № 110145 [14].

Литература

1. Патент № 30541 Україна, МПК (2006) G01N 27/82. Спосіб контролю властивостей виробів з залізовуглецевих сплавів неруйнівним магнітним методом [Текст] / М.Г. Поздняков - № 200713586; заявл. 05.12.2007; опубл. 25.02.2008, Бюл. – бс.: іл.
2. Патент № 71815 Україна, МПК (2012.01) G01D 21/00 G01N 3/317 (2006.01). Спосіб оцінки якості та властивостей виробів [Текст] / Т.С. Скобло, С.О. Бурцев; заявник і патентоутримувач ХНТУСГ ім. П. Василенка. - № 201200948; заявл. 30.01.2012; опубл. 25.07.2012, Бюл. 14 – бс.: іл.
3. Оценка состояния наплавленного металла барабана котла высокого давления по коэрцитивной силе металла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sostoyaniya-naplavlennogo-metalla-barabana-kotla-vysokogo-davleniya-po-koertsitivnoy-sile-metalla>.
4. Скобло Т. С. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна [Текст] / Т. С. Скобло, О. Ю. Ключко, Е. Л. Белкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, Москва, т.

78, № 6, 2012 г. – с. 35–42.

5. Скобло Т. С. Оценка степени неоднородности карбидов гетерогенных сплавов методом оптико-математического анализа при помощи изменчивости условных цветов [Текст] / Т. С. Скобло, О. Ю. Ключко, Е. Л. Белкин, О. И. Тришевский // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві, Харьков, Вип. 168, 2016 г. – с. 174–186.
6. Скобло Т. С. Исследование структуры высокохромистого комплекснолегированного чугуна с применением методов математического анализа [Текст] / Т. С. Скобло, О. Ю. Ключко, Е. Л. Белкин // Сталь, № 3, 2012 г. – с. 46–52.
7. Тришевский О. И. Исследования микроструктур гетерогенных сплавов методом математического анализа при помощи сочетаний условных цветов и абсолютных значений лапласианов [Текст] / О. И. Тришевский, Т. С. Скобло, О. Ю. Ключко, Е. Л. Белкин // Промышленность в фокусе, Харьков, №7 (31), 2015 г. – с. 52–56.
8. Скобло Т. С. Определение микротвердости структурных составляющих высокохромистых чугунов в результате математической обработки их изображений [Текст] / Т. С. Скобло, О. Ю. Ключко, Е. Л. Белкин // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Проблеми надійності машин та засобів механізації с/г виробництва, Харьков, Вип. 151, 2014 г. – с. 183–189.
9. Чувствительность чугунов к концентрации напряжений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mash-xxl.info/info/544001>.
10. Зельдович Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений [Текст] / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Раизер // Москва, «Наука», 1966 г. – 688 с.
11. Великович А. Л. Физика ударных волн в газах и плазме [Текст] / А. Л. Великович, М. А. Либерман // Москва, «Наука», 1987 г. – 298 с.
12. Принцип Сен-Венана и гипотеза плоских сечений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://scask.ru/book_rbt.php?id=18.
13. Эффекты второго порядка и принцип Сен-Венана в задаче кручения нелинейно-упругого стержня. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sibran.ru/upload/iblock/e3c/e3c2e51ba6e64e0b53ef244424f84df6.pdf>.
14. Патент № 110145 Україна, (2016.01) G01N27/00 G01N3/317 Спосіб контролю якості поршневих кілець, зміцнених плівковими покриттями [Текст] / Скобло Т.С., - № 201603524; заявл. 04.04.2016, опубл. 26.09.2016, Бюл. 18 – 4с.: іл.

Summary

Maltsev T.V. Complex evaluation of residual stresses in piston rings

The way of evaluation and monitoring of the inhomogeneity degree of the stress-strain state of oil scraper piston rings of diesel generator D100 by the coercive force measuring and change the lock line size before and after hardening by the ion-plasma coating is shown. Evaluation of stresses by optic-mathematical method after preliminary bench testing on friction and wear is done.

Keywords: piston ring, the coercive force, the size of the lock, ion-plasma coating, optic-mathematical method, friction and wear

References

1. Patent № 30541 Ukrayina, MPK (2006) G01N 27/82. Sposib kontrolyu vlastivostey virobiv z zallzovugletsevih splaviv neruynivnim magnitnim metodom [Tekst] / M.G. Pozdnyakov - № 200713586; zayavl. 05.12.2007; opubl. 25.02.2008, Byul. – 6s.: Il.
2. Patent № 71815 Ukrayina, MPK (2012.01) G01D 21/00 G01N 3/317 (2006.01). Sposib

- otsInki yakostI ta vlastivostey virobIv [Tekst] / T.S. Skoblo, S.O. Burtsev; zayavnik I patentoutrimuvach HNTUSG Im. P. Vasilenka. - № 201200948; zayavl. 30.01.2012; opubl. 25.07.2012, Byul. 14 – 6s.: II.
3. 3. Otsenka sostoyaniya naplavlennogo metalla barabana kotla vyisokogo davleniya po koertsitivnoy sile metalla [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sostoyaniya-naplavlennogo-metalla-barabana-kotla-vysokogo-davleniya-po-koertsitivnoy-sile-metalla>.
 4. 4. Skoblo T. S. Primenenie kompyuternogo analiza metallograficheskikh izobrazheniy pri issledovanii strukturyi vyisokohromistogo chuguna [Tekst] / T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, E. L. Belkin // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov, Moskva, t. 78, № 6, 2012 g. – s. 35–42.
 5. 5. Skoblo T. S. Otsenka stepeni neodnorodnosti karbidov geterogennykh splavov metodom optiko-matematicheskogo analiza pri pomoschi izmenchivosti uslovnnykh tsvetov [Tekst] / T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, E. L. Belkin, O. I. Trishevskiy // VIsnik HNTUSG Im. P. Vasilenka. ResursozberlgayuchI tehnologIyi, materIali ta obladnannya u remontnomu virobnitstvI, Harkov, Vip. 168, 2016 g. – s. 174–186.
 6. 6. Skoblo T. S. Issledovanie strukturyi vyisokohromistogo kompleksnolegirovannogo chuguna s primeneniem metodov matematicheskogo analiza [Tekst] / T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, E. L. Belkin // Stal, # 3, 2012 g. – s.46–52.
 7. 7. Trishevskiy O. I. Issledovaniya mikrostruktur geterogennykh splavov metodom matematicheskogo analiza pri pomoschi sochetaniy uslovnnykh tsvetov i absolyutnykh znacheniy laplasianov [Tekst] / O. I. Trishevskiy, T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, E. L. Belkin // Promyshlennost v fokuse, Harkov, №7 (31), 2015 g. – s.52–56.
 8. 8. Skoblo T. S. Opredelenie mikrotverdosti strukturnykh sostavlyayuschikh vyisokohromistykh chugunov v rezultate matematicheskoy obrabotki ih izobrazheniy [Tekst] / T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, E. L. Belkin // VIsnik HNTUSG Im. P. Vasilenka. Problemi nadlynostI mashin ta zasobIv mehanIzatsIyi s/g virobnitstva, Harkov, Vip. 151, 2014 g. – s.183-189.
 9. 9. Chuvstvitelnost chugunov k kontsentratsii napryazheniy [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://mash-xxl.info/info/544001>.
 10. 10. Zeldovich Ya. B. Fizika udarnykh voln i vyisokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy [Tekst] / Ya. B. Zeldovich, Yu. P. Raizer // Moskva, «Nauka», 1966 g. –688 s.
 11. 11. Velikovich A. L. Fizika udarnykh voln v gazah i plazme [Tekst] / A. L. Velikovich, M. A. Liberman // Moskva, «Nauka», 1987 g. –298 s.
 12. 12. Printsip Sen-Venana i gipoteza ploskikh secheniy. [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: http://scask.ru/book_rbt.php?id=18.
 13. 13. Effektyi vtorogo poryadka i printsip Sen-Venana v zadache krucheniya nelineynouprugogo sterzhnya. [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.sibran.ru/upload/iblock/e3c/e3c2e51ba6e64e0b53ef244424f84df6.pdf>.
 14. 14. Patent № 110145 Ukrayina, (2016.01) G01N27/00 G01N3/317 SposIb kontrolyu yakostI porshnevnykh kIlets, zmItsnennykh plIvkovimi pokrityami [Tekst] / Skoblo T.S., - № 201603524; zayavl. 04.04.2016, opubl. 26.09.2016, Byul. 18 – 4s.: II.