

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОПНЕВМОАРМАТУРЫ ДЛЯ И ЛА

Ю.И. Кондрашов,
Е.Н. Ермилова,
А.Н. Видяскина

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва

Московское шоссе, 34,
г. Самара, Российская Федерация,
443086

ermilova6488@gmail.com

В статье рассматриваются методы оценки нагруженного деформированного состояния конструктивных элементов гидропневмоарматуры с использованием современных программных комплексов. Также показан комплексный подход применения конструктором конструктивных и технологических способов повышения долговечности деталей. Рассматривается возможность применения метода алмазного выглаживания на примере упрочнения поверхности корпуса клапана и фланца, а также проведено сравнение этого метода с другими известными технологическими способами поверхностного упрочнения.

Ключевые слова: *нагруженное деформированное состояние; конструктивное решение; алмазное выглаживание; зоны предполагаемого разрушения; концентраторы напряжений*

1 Введение

При проектировании современных конструкций двигателей летательных аппаратов (ДЛА) и летательных аппаратов (ЛА) различного назначения в число основных требований, предъявляемых к надежности – постоянно возрастающие требования к увеличению ресурса, что естественно оказывает влияние выбор форм, размеров, материалов, позволяющих снижать и находить оптимальные конструктивные решения при создании многочисленных пневмогидроагрегатов, используемых в различных системах для управления потоком рабочих сред ДЛА и ЛА.

В этом процессе при проектировании агрегатов большую роль играет использование вышеперечисленных методов на базе современного программного обеспечения с использованием методов конечных элементов, компьютеров, которые позволяют быстро оценивать прочность, надежность, конструкции и продемонстрировать пути оптимальных решений. Кроме обоснованной расчетным путем оптимально спроектированной конструкции, немаловажную роль играют

возможности использования современной технологии для достижения вышеназванных важных целей поверхностный наклеп позволяет изменить структуру напряжений в поверхностном слое и повысить коррозионностойкие свойства материала.

Использование метода конечных элементов, 3D моделирования и современного программного обеспечения на их основе, такого как ANSYS, SolidWorks, КОМПАС и др., позволяет конструктору определить зоны максимальных напряжений и деформаций в локальных зонах, в которых могут появляться микротрещины, которые тоже ограничивают ресурс агрегатов.

Однако, при использовании в расчетах вышеперечисленные существующие программные средства не позволяют в полном объеме оценить фактические напряжения в деталях агрегатов, подвергаемых воздействию рабочей среды. Это происходит, поскольку в процессе изготовления агрегатов в зависимости от различных способов получения конечных размеров детали в поверхностном слое, в том числе в местах концентрации напряжений, возникают дополнительные напряжения растяжения, величина которых зависит от режимов и методов формирования окончательных размеров

детали. Эти напряжения суммируются с расчетными. Также необходимо учитывать, что многие детали работают при воздействии высоких температур [1,2,3,4,5].

2 Оценка нагруженного деформированного конструктивных элементов гидропневмоарматуры

Оценка нагруженного деформированного состояния конструктивных элементов гидропневмоарматуры аналитическими методами всегда связана с рядом упрощений и допущений, которые существенно влияют на результаты. Еще более значительные трудности возникают при необходимости оценить упругопластическое нагруженное деформированное состояние. Также необходимость имеет место из-за присутствия острых концентраторов и вероятности появления локальных микротрещин в зонах высокого нагружения в деталях агрегатов, нагруженных внутренним давлением, имеющих сложную

конструкцию особенно корпусов комплексных агрегатов. Завышение запасов прочности конструктором при проектировании таких деталей приводит к увеличению расхода материалов и в целом массы изделия, что для ДЛА и ЛА недопустимо. Вопросы применения метода конечных элементов в задачах механизма разрушения рассматриваются в работах [1,2].

Оценить правильность принятого оптимального конструктивного решения с учетом всех вышеперечисленных факторов и возможностей технологии изготовления деталей влияющих на их долговечность дают только результаты натурных испытаний.

На примере корпуса клапана (рисунок 1) и фланца (рисунок 2), изготовленных из материала Ст 30Х, ГОСТ 33260-2015 с $\sigma_{вр} = 450$ МПа, $\sigma_{-1} = 33$ МПа, $\tau_{-1} = 240$ МПа показан комплексный подход применения конструктором сочетания конструктивных и технологических способов повышения долговечности деталей.

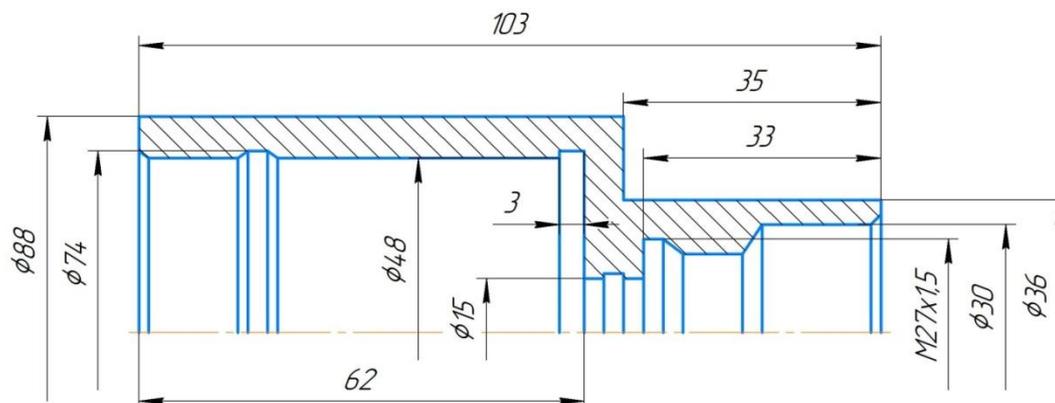


Рисунок 1. Корпус клапана

В качестве конструктивного решения основанного на проведенных расчетах с помощью метода конечных элементов и использовании программы Ansys для определения зоны максимальных концентраторов напряжений (рисунок 3).

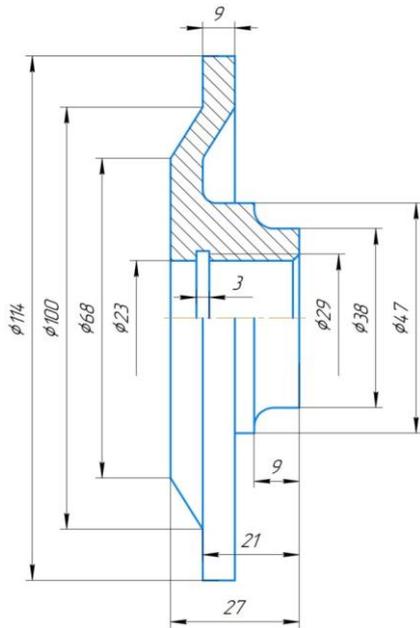
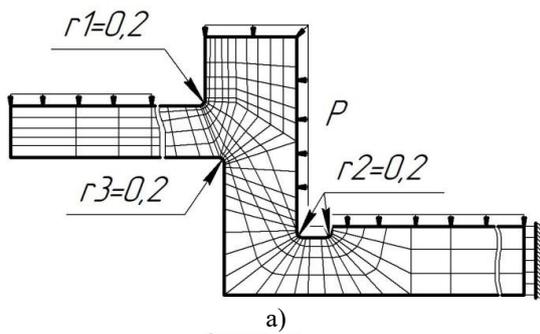
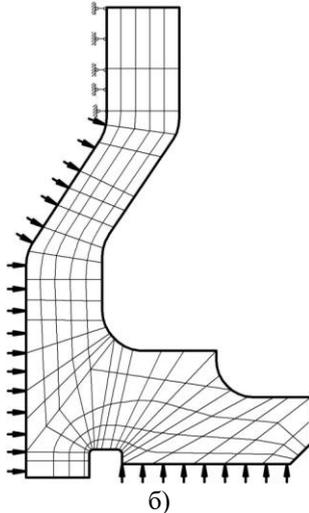


Рисунок 2. Фланец



а)

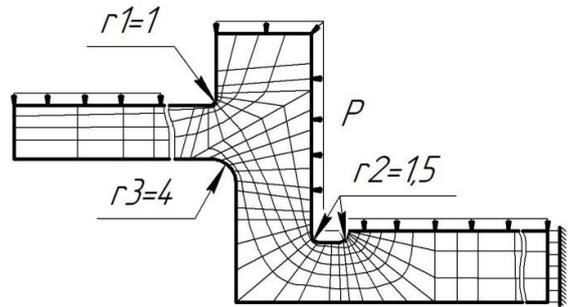


б)

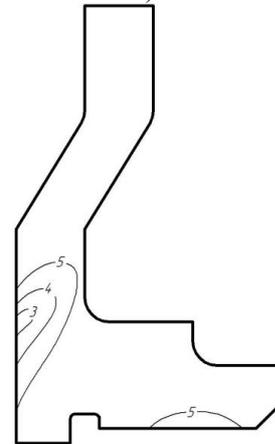
Рисунок 3. Зоны максимальных напряжений
а – корпус клапана, б – фланец

После изменения радиусов r_1, r_2, r_3 и проведения алмазного выглаживания, в том числе и в зонах максимальных напряжений, был проведен повторный расчет, который

сохранил картину распределения напряжений и подтвердил зоны предполагаемого разрушения и предельных относительных нагрузок (рисунок 4).



а)



б)

Рисунок 4. Зоны максимальных напряжений
а – корпус клапана, б – фланец

Алмазное выглаживание в качестве одного из способов повышения долговечности деталей было выбрано исходя из его ряда преимуществ по сравнению с другими известными технологическими способами поверхностного упрочнения [5,6,7].

Результаты сравнительных испытаний неупрочненных и упрочненных алмазным выглаживанием образцов из стали 40 ($\sigma_v = 70 \text{ кгс/мм}^2$ $HV = 217$), стали 35ХН1М ($\sigma_v = 110 \text{ кгс/мм}^2$ $HRC = 30-32$), цементуемой стали ($\sigma_v = 110 \text{ кгс/мм}^2$ $HRC = 63-65$) показали, что предел выносливости в результате алмазного выглаживания увеличился на 17-25%.

Выглаживание является одним из методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим

деформированием и заключается в пластическом деформировании поверхности скользящем по всей поверхности выглаживателем – алмазным наконечником, закрепленным в оправке.

Затрачиваемая в процессе выглаживания энергия почти вся переходит в тепло, нагревающее деталь и инструмент. Нагрев тонких поверхностных слоев детали в процессе обработки влияет на качество обрабатываемой поверхности, на величину остаточных напряжений, структурное и фазовое состояние металла.

Особенно эффективно в местах концентрации напряжений (отверстиях, радиусах поворотов с одной поверхности на другую, маложестких тонкостенных деталях, а также в деталях из высокопрочных и

закаленных сталей, которые затруднительно обрабатывать существующими методами поверхностного пластического деформирования. В частности, особенно это заметно при использовании алмазного выглаживания на сталях с большой твердостью. Например: для стали 14X2H3MA с HRC= 63-65 предел выносливости σ_{-1} в кгс/мм² составил 100 при алмазном выглаживании, а при упрочнении обкаткой шариком этот предел для этой стали составил всего $\sigma_{-1} = 85$ кгс/мм². И существенное повышение пределов выносливости происходит при наличии коррозионной среды по сравнению с неупрочненным способом поверхностной обработки (таблицу 1).

Таблица 1. Значения пределов выносливости стали 35ХН1М в коррозионной среде

Характеристика образцов	Предел выносливости на воздухе в кгс/мм ²	Пределы выносливости в водопроводной воде в кгс/мм ² при числе циклов испытаний			
		20·10 ⁶	30·10 ⁶	50·10 ⁶	100·10 ⁶
Неупрочненные	52	13	12	10	-
Упрочненные	59	38	35	32	23

Как видно из таблицы 1, алмазное выглаживание является эффективным средством повышения коррозионно-усталостной прочности. Усталостные испытания, проведенные при значительной продолжительности (30-100 млн. циклов), позволяют заключить, что алмазное выглаживание дает возможность повысить предел выносливости в коррозионной среде примерно в 3 раза, а долговечность – в среднем в 30-40 раз. Высокую коррозионно-усталостную прочность выглаженной поверхности можно объяснить благоприятным сочетанием её свойств (небольшой и округлой шероховатостью значительным упрочнением, повышением структурной однородности поверхностного слоя, остаточными напряжениями сжатия) [5].

В качестве критерия оценки предложенного сочетания конструктивно-технологических изменений и их влияния на долговечность, были выбраны результаты

относительной предельной нагрузки при циклических испытаниях при нормальной температуре и постоянном давлении, выдерживаемых деталями до разрушения по сравнению с исходными (без конструктивных и технологических изменений). Эти испытания показали увеличение количества циклов до разрушения на 25-30%, правда, при этом одновременно масса детали увеличилась на 1-1,5% за счет изменения конструктивных параметров [5].

Одним из наиболее перспективных методов поверхностной обработки деталей и сплавов, решающих аналогичные вопросы, является метод металлизации напылением и ионной металлизации.

В последнее время в машиностроительной технологии всё шире применяется новый, эффективный способ улучшения качества конструкционных материалов – ионная имплантация [8,9]. Особенно хорошие результаты использования этого метода были получены

при изготовлении лопаток ГТД [10,11]. Применение ионной имплантации при изготовлении деталей агрегатов, работающих в широком температурном диапазоне и зачастую в различных коррозионных средах, открывают широкие возможности в целях повышения долговечности агрегатов, но при этом требует отработки технологического процесса с учетом конкретного технологического исполнения детали, подвергаемой ионной имплантации.

Ионная имплантация – это принудительное проникновение ионов в кристаллические решетки твердых тел. Это проникновение способствует возникновению процессов, несоответствующих законам термодинамики. Таким образом можно искусственно создать в приповерхностных слоях деталей материалы, обладающими уникальными свойствами.

Во время ионной имплантации, ионизированные атомы или молекулы, ускоренные в электрическом поле высокого напряжения, обстреливают поверхность обрабатываемой детали. Во время удара ионы сталкиваются с атомами материала, теряют первоначальную энергию и проникнув вглубь поверхности обрабатываемого материала, останавливаются. Контакты ионов с атомами бывают двух видов: упругие и неупругие. Во время упругого контакта часть своей энергии ионы передают задеваемым атомам и меняют направление движения. Атом, получив удар, передвигается, задевая другие атомы. Таким образом, в микрообъеме с условного места приходит в движение вся атомная цепь. Во время неупругого удара ионы теряют часть своей энергии и выделяют элементарную частицу. Возникает радиоактивное излучение. Проникающие ионы, задевая атомы, движутся ломанной траекторией, пока их энергия не уменьшается до граничных величин.

Под воздействием ионов в кристаллических решетках возникают дефекты, увеличивается скорость и

интенсивность диффузии. Толщина ионизированной поверхности составляет до миллиметра и более. Толщина обрабатываемого слоя зависит от атомной массы и числа имплантируемых ионов, а также от напряжения ускоряющего тока.

Хотя способ ионной имплантации сравнительно новый и является в стадии дальнейших исследований, он уже широко применяется в технике и завоевывает все новые отрасли применения. Например, после имплантации ионами азота чистый армак (железо) свою коррозионную стойкость увеличивает до 4 раз. В приповерхностных слоях металлов после ионной имплантации возникает оксидная пленка, которая препятствует окислению глубинных приповерхностных слоев материала детали во время её технологической обработки. Работоспособность режущих поверхностей фрез имплантированных ионами азота увеличивается в 2 раза. Работоспособность деталей насосов, изготовленных из нержавеющей стали, после имплантации ионами азота увеличивается в несколько раз, при этом сохраняя свои качества нержавеющей стали.

Схема ионного имплантатора представлена на рисунке 5.

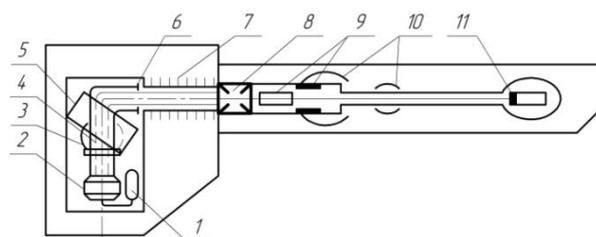


Рисунок 5. Схема ионного имплантатора:

1 – газовая камера, 2 – ионный источник, 3 – вакуумный источник, 4 – луч ионов, 5 – магнит-анализатор, 6 – разделяющая диафрагма, 7 – ионный ускоритель, 8 – электростатическая линза, 9 – горизонтальная и вертикальная направляющие пластинки, 10 – устройство формирования ионного луча, 11 – имплантируемая поверхность детали

Электрическая дуга горит в газе ионизированного металла или в ионизированном газе. Для того, чтобы луч ионов был стабилен, в зону дуги непрерывно подается пар или газ ионизируемого

материала. Газовые имплантируемые материалы (азот, кислород и др.) подаются в зону дуги в натуральном виде. Современные имплантаторы имеют по несколько каналов подключения ионовых сточников, поэтому поверхность изделий можно обрабатывать одновременно ионами нескольких элементов. Из зоны электрической дуги ионы направляются в анализатор. Назначением анализатора является отделение – сепарация нежелательных ионов. Например, из металлов хлоридов возникают ионы хлора, из других материалов ионы окиси углерода, диоксид и другие компоненты, которые необходимо отделить.

Через отверстия диафрагмы ионы попадают в ускоритель (паразитные ионы, движущиеся другими траекториями в диафрагме задерживаются). В ускорителе ионы приобретают необходимую скорость, а электростатические линзы формируют целенаправленный луч. Специальное устройство позволяет регулировать температуру имплантируемой детали.

Общий вид стандартного имплнтатора представлен на рисунке 6.

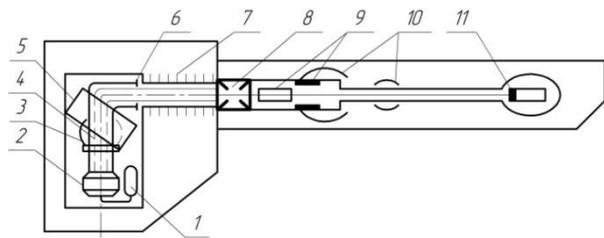


Рисунок 6. Общий вид стандартного имплнтатора

Процесс, близкий к ионной имплантации, есть ионное покрытие. Во время ионного покрытия бомбардирующие ионы не проникают в приповерхностные слои деталей, а только их покрывают. Этим способом можно покрывать металлы, пластмассы, керамику, бумагу и другие материалы.

Ионным покрытием можно увеличить трещиностойкость, прочность и жесткость деталей, увеличить коррозостойкость, выравнять микронеровности.

3 Заключение

Таким образом, комплексные решения вышеописанных конструктивных технологических методов повышения износоустойчивости поверхностной твердости коррозионностойкости, снижения нагружений растяжений в поверхностном слое на деталях, имеющих ограниченный ресурс и выявляемых соответственно при ресурсных испытаниях, позволяют после внедрения этих мероприятий повысить ресурс гидropневмоагрегатов на 15-18%. Критерием оценки служило количество циклов выдерживаемых агрегатом при одном и том же давлении рабочей среды до отказа. А способы применения технологических методов повышения конкретных деталей агрегатов напрямую зависят от технических возможностей предприятия-изготовителя агрегатов гидropневмоаппаратуры.

Список использованных источников

- [1] Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике – М. Мир, 1975 – 541с.
- [2] Casciaro P. Cascilini L.A. Mixed formulation and mixed finite elements for limit analysis//int. S.Num.Meth.Eng. – 1982– 18, №2, P. 211-243.
- [3] Беркович И.И., Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов / Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Под ред. Д.Г. Громаковского; – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. – 268 с.
- [4] Пачурин Г.В. Микромеханизмы высокотемпературной усталости и ползучести металлов и сплавов: учебное пособие. / Пачурин Г.В., Шевченко С.М., Дубинский В.Н., Власов О.В – Н. Новгород: НГТУ, 2006. – 131 с.
- [5] Торбило В.М. Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
- [6] Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием - М.: Машиностроение, 2002. - 299 с.
- [7] Определение рациональных условий обработки на операциях точения и растачивания [Электронный ресурс] электрон метод. указания к лаб. работам / сост. Д. Л. Скуратов, Е. А. Буланова, А. Н. Швецов – М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (7,07 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

- [8] Ian G. Brown, Editor, The Physics and Technology of Ion Sources, John Wiley & Sons, New York, 1989, 464 pages
- [9] Х. Риссел. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге; Перевод с нем. В. В. Климова, В. Н. Пальянова. - М.: Наука, 1983. - 360 с.
- [10] Гусева М. И., Носков А. Н., Сулима А. М. и др. Ионное легирование жаропрочных сплавов для лопаток ГТД // Авиационная промышленность. – 1988. – № 5. С. 65.

INCREASING THE SERVICE LIFE OF THE CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF THE HYDRO-PNEUMATIC FIXTURES FOR CRAFTS AND FLIGHT-TYPE ENGINES

**Yuriy I. Kondrashov,
Anna N. Vidyaskina,
Elena N. Ermilova**

Samara National Research University
34, MOSKOVSKOESHOSSE,
SAMARA,
443086, RUSSIAN FEDERATION

ermilova6488@gmail.com

The article discusses methods for estimation the loaded deformation state of structural elements of hydro-pneumatic fixtures using modern software application. It also shows a complex approach to the use of constructive and technological methods of increasing the durability of details. The possibility of using the method of diamond burnishing is considered on the example of hardening the surface of the valve body and flang. Also, this method is compared with other known technological methods of surface hardening.

Keywords: loaded deformation state; constructive solution; diamond burnishing; potential fracture zone; stress concentrators

References

- [1] Zenkevich O. Metod konechnyh elementov v tekhnike [The finite element method in technology] - Moscow: Mir Publ., 1975 - 541p.
- [2] Casciaro P. Cascilini L.A. Mixed formulation and mixed finite elements for limit analysis//int. S.Num.Meth.Eng. – 1982– 18, №2, P. 211-243.
- [3] Berkovich I.I. Tribologiya. Fizicheskie osnovy, mekhanika i tekhnicheskie prilozheniya [Tribology. Physical fundamentals, mechanics and engineering applications]: Textbook for universities / Berkovich I.I., Gromakovskij D.G. – Samara: Samara State Technical University Publ., 2000 – 268 p.
- [4] Pachurin G.V. Mikromekhanizmy vysokotemperaturnoj ustalosti i polzuchesti metallov i splavov [Micromechanisms of high-temperature fatigue and creep of metals and alloys]: Textbook / Pachurin G.V., SHEvchenko S.M., Dubinskij V.N., Vlasov O.V. – N. Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University Publ, 2006 .– 131 p.
- [5] Torbilo V.M. Almaznoe vyglazhivanie [Diamond burnishing] – Moscow: Mechanical Engineering Publ., 1972 - 105 p.
- [6] Smelyanskij V. M. Mekhanika uprochneniya detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Mechanics of details hardening by surface plastic deformation] / VM Smelyanskiy. – Moscow: Mashinostroenie Publ, 2002 .– 299 p.
- [7] Opredelenie racional'nyh uslovij obrabotki na operacijah tocheniya i rastachivaniya [Determination of efficient processing conditions for turning and boring operations] [Electronic resource]: electronic laboratory operations manual / Skuratov L., Bulanova E. A., Shvetsov A. N. – Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev (National Research University) – Electron. text and graph data (7.07 MB). - Samara, 2013.- (1 CD-ROM).
- [8] Ian G. Brown, Editor, The Physics and Technology of Ion Sources, John Wiley & Sons, New York, 1989, 464 p.
- [9] H. Rissel, I. Ruge, Ion implantation, Translation from German by V. V. Klimov, V. N. Palyanova. – Moscow: Nauka Publ, 1983 .-- 360 p.
- [10] Guseva M.I., Noskov A. N., Sulima A. M. Ionnoe legirovanie zharoprochnyh splavov dlya lopatok GTD [Ion-implantation process of heat-resistant alloys for GTE blades] // Aviacionnaya promyshlennost [Aviation industry]. – 1988. – №5. P. 65.