

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>
Выпуск 6 (25) 2014 ноябрь – декабрь <http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-6-14>
URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/186TVN614.pdf>
DOI: 10.15862/186TVN614 (<http://dx.doi.org/10.15862/186TVN614>)

УДК 620.22

Банас Игорь Павлович

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
Государственный научный центр Российской Федерации
Россия, Москва¹
Начальник сектора
Кандидат технических наук
E-Mail: olegsedov@yahoo.com

Седов Олег Владимирович

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
Государственный научный центр Российской Федерации
Россия, Москва
Инженер 1 категории
E-Mail: olegsedov@yahoo.com

Коробова Елена Николаевна

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
Государственный научный центр Российской Федерации
Россия, Москва
Ведущий инженер
E-Mail: olegsedov@yahoo.com

Зайцев Денис Владимирович

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
Государственный научный центр Российской Федерации
Россия, Москва
Ведущий инженер
E-Mail: olegsedov@yahoo.com

Деформационно-дисперсионное упрочнение коррозионностойкой стали

¹ 105275, Москва, проспект Буденного дом 25А

Аннотация. В статье авторами с, практической точки зрения, рассматривается актуальная в современном машиностроении проблема острой потребности в износостойких и одновременно коррозионностойких сталях. Как один из наиболее простых, эффективных и распространенных в отечественной промышленности методов повышения износостойкости деталей приведен процесс азотирования. Глубокому и всестороннему анализу подвергнуты последствия использования азотирования применительно к конкретной коррозионностойкой стали 05X12H2K3M2AF. Подробно показано как конкретные режимы термической обработки влияют на прочность и коррозионную стойкость. Уделено внимание особенностям применения азотирования для малогабаритных и длиномерных деталей. Предложен режим деформационно-дисперсионного упрочнения коррозионностойкой стали 05X12H2K3M2AF, обеспечивающий теплостойкость при предельно высокой температуре азотирования, обеспечивающей получение бездефектного слоя. Поэтапно показаны причины и последствия выбора конкретных температур и времени обработки. Подробно описаны режимы испытаний и их результаты. Приведенные результаты исследований (микроисследования, электронномикроскопическое, подробно пояснены, в части зависимости структуры от определенных режимов обработки и их влияние прочностные свойства. Четко показан сам механизм упрочнения. Данная статья представляет интерес не только для научного сообщества, приведенный в ней материал может быть интересен инженерно-техническим работникам промышленных предприятий и педагогам занимающимся подготовкой специалистов для работы в машиностроительной отрасли.

Ключевые слова: азотирование; горячая деформация; прочность; твердость; дефект.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Банас И.П., Седов О.В. Коробова Е.Н., Зайцев Д.В. Деформационно-дисперсионное упрочнение коррозионностойкой стали // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. № 6
<http://naukovedenie.ru/PDF/186TVN614.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI:
10.15862/186TVN614

В современной авиации, энергетике, промышленности и транспорте широко применяются газотурбинные установки. Их широкое распространение стало возможным благодаря более высокой энергоотдаче, компактности и малому весу по сравнению с другими типами силовых установок. Высокие удельные параметры газотурбинных установок обеспечиваются особенностями конструкции и термодинамикой цикла работы. Цикл газотурбинной установки, хотя и состоит из тех же основных процессов, что и цикл двигателя внутреннего сгорания, имеет существенное отличие. В двигателе внутреннего сгорания процессы происходят последовательно, один за другим, в одном и том же элементе двигателя – цилиндре. В газотурбинной установке эти процессы происходят одновременно и непрерывно в различных элементах. Благодаря этому в установке нет неравномерности условий работы элементов. Это позволяет сосредоточить в газотурбинной установке большие мощности. Газотурбинные установки за последние пятьдесят лет стали основным типом двигателей в современной авиации. На основе авиационных газотурбинных двигателей созданы двигатели для наземной и морской техники: мобильных электростанций, газокompрессорных станций, наземных и морских транспортных средств. - классический пример сложнейшего устройства, детали которого работают длительное время в условиях предельно высоких температур и нагрузок. Вместе с тем эти двигатели - образец высочайшей надежности, которая обеспечивается эффективными конструкторскими решениями, сложными газодинамическими, тепловыми и прочностными расчетами, применением в их конструкции передовых материалов и способов их обработки. В связи с этим разработка новых способов упрочения деталей для изготовления газотурбинных установок, выходит за рамки исключительно научно-исследовательской задачи. Анализ существующего состояния развития газотурбинных установок показывает, что необходимость наращивания ресурса работы и ужесточение требований к средам работы неизбежно влечет за собой применение новых материалов или, что значительно экономичнее, применение новых способов обработки существующих материалов. В большинстве современных газотурбинных установок возникает потребность в износостойких и одновременно коррозионностойких сталях [1]. Насыщение поверхности коррозионностойких деталей углеродом резко снижает коррозионную стойкость. В меньшей степени снижается коррозионная стойкость при азотировании. Однако при наличии в азотированном слое углерода коррозионная стойкость ухудшается значительно больше, чем в безуглеродистом азотированном слое [2].

С целью повышения коррозионной стойкости азотированной поверхности была создана практически безуглеродистая коррозионностойкая сталь 05X12H2K3M2AФ с небольшим содержанием азота (0,06 – 0,09)%. Разработанный для нее режим термообработки – закалка с 930°C отпуск при 600°C обеспечивал прочность выше 980 МПа. При этом она устойчива против окисления в воздушной среде при температуре до 600°C, не подвергается межкристаллитной коррозии в условиях тропической и соляной камеры [3]. Коррозионная стойкость азотированного слоя выше, чем у всех ранее испытанных азотированных сталей, в том числе при циклических нагревах до 600°C, при этом азотирование проводилось при 580°C 24 часа [4].

Но все это верно только для малогабаритных образцов. На длинномерных деталях ($\varnothing 30$, 1300) мм качественный азотированный слой получался при толщине 0,15-0,25 мм. При слое толщиной 0,3 мм на границе слоя и сердцевины возникали трещины (рис.1). Для уменьшения напряжения на границе слой-сердцевина была повышена температура азотирования до 600°C [5]. При этой температуре азотирования исчезли не только подслоиные трещины, но и поверхностные зернограницные трещины.

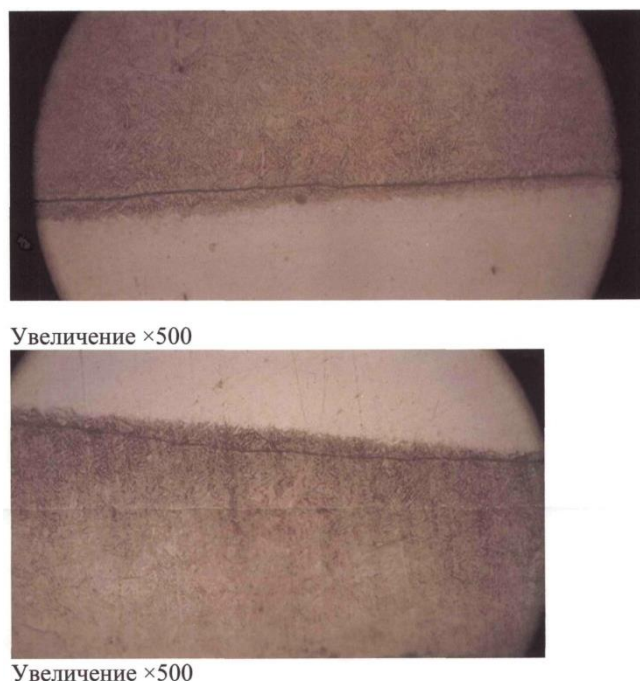


Рис. 1. Трещины на границе азотированного слоя и сердцевины на глубине 0,3 мм.

Однако указанный режим не обеспечивал необходимую прочность сердцевины. После стандартной термообработки (закалка с 930°C в масле, отпуск при 600°C) твердость и прочность за 20 часов азотирования при 580°C понижалась с (32-33)HRC и (980-1010)МПа до (29-30)HRC и (880-930)МПа. После азотирования при 600°C прочность сердцевины снижалась на (150-180)МПа. Поиск другой температуры закалки не дал положительного результата. Закалка с разных температур от 800°C до 1100°C не обеспечивала теплостойкость стали при 600°C.

В связи с этим было принято решение опробовать теплостойкость стали без закалки, с высокотемпературным отпуском непосредственно после горячей пластической деформации [6]. Предложен режим испытания: пруток $\varnothing 60$ мм прокован до $\varnothing 30$ мм. Нагрев перед деформацией – до 1140°C, закончена ковка при (980-1000)°C. Затем следует охлаждение на воздухе и отпуск при (630-640)°C 4 часа. Из кованных прутков были изготовлены образцы. Результаты испытания механических свойств приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытания

σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	Ψ %	KCU Дж/см ²
1096	998	19,0	61,0	11,0
1090	994	19,0	65,0	13,5
1090	998	19,5	65,0	13,7
1081	992	20,0	66,5	9,5
1145	1103	19,5	65,0	14,0
1110	1034	19,0	61,0	9,8
1095	991	20,0	63,0	10,3
1130	1065	20,0	61,0	9,5
1111	1047	19,0	61,0	11,0
1115	1047	19,5	59,0	12,0

Контрольную группу кованых прутков закалили до 980°C в масле и отпустили при 620°C. Результаты испытаний закаленных образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний закаленных образцов

σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	Ψ %	КСУ Дж/см ²
980	901	18,5	73,0	12,7
980	882	18,5	68,0	13,0
1010	892	17,0	70,0	13,0
980	882	17,0	70,0	11,0
1030	901	18,5	73,0	15,0
1010	911	18,5	73,0	11,7

Имеется небольшое преимущество прочности образцов без закалки. Далее незакаленные образцы испытали после длительных нагревов, имитирующих азотирование (Таблица 3).

Таблица 3

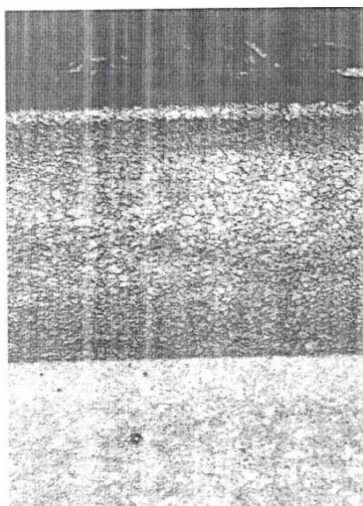
Результаты испытаний после длительных нагревов

Режим нагрева	Твердость HRC	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	Ψ %	КСУ Дж/см ²
600°C 24 часа	32-33	1058	980	19,0	64,0	10,8
		1078	990	20,0	65,0	12,7
		1078	970	20,0	65,0	11,8
620°C 24 часа	33-34	1068	970	21,0	66,0	11,8
		1068	990	20,0	65,0	11,8
		1058	980	20,0	66,0	10,8

Результаты показали, что без закалки сталь практически не разупрочняется при длительном нагреве 600°C, и даже при 620°C сохраняется прочность выше 1000МПа [7].

Проверка прокатанного прутка в условиях металлургического производства (начало прокатки 1180°C, конец прокатки 950-1000°C, отжиг при 630°C) показала, что свойства промышленного металла совпадают с данными, приведенными в таблице 1.

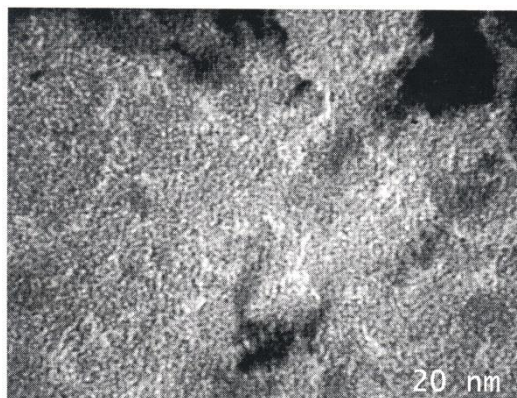
При микроисследовании промышленного металла выявились границы мельчайших зерен, размер которых соответствовал примерно 10-11 баллу (Рис.2). После закалки размер зерна соответствовал 7-8 баллам [8]. Измельчение зерна позволяет предотвратить при азотировании образование зернограничной нитридной сетки в приповерхностной зоне слоя [9].



×200

Рис. 2. Микроструктура азотированного слоя стали 05X12H2K3M2AФ выполненного при 600°C за 20 часов

При электронномикроскопическом исследовании структуры промышленного металла выявились четкие субмикронородности (Рис.3), где мельчайшие точечные выделения выстроены в параллельные полосы, декорирующие линейные дефекты кристаллического строения, вероятно дислокации [10]. Такое строение стали подтверждает возможность сохранения упрочненного состояния при повышенной температуре отпуска.



×350 000

Рис. 3. Электронно-микроскопическое исследование стали 05X12H2K3M2Ф Темнопольное изображение

Рентгеноструктурным методом пока не удалось идентифицировать состав и структурное состояние мелкодисперсной вторичной фазы [11]. Так как в стали содержится азот, можно предположить, что зародышами вторичной фазы являются субмелкодисперсные частицы нитридов, вокруг которых возможно скопление нитридообразующих легирующих элементов. Газовое азотирование незакаленных образцов провели при 600°C с выдержкой 20 часов [12]. Степень диссоциации аммиака была в пределах 40-60%. Получена глубина слоя 0,30 мм.

Твердость азотированной поверхности составляла 860HV. Твердость сердцевины – (33-34)HRC. Никаких дефектов азотированной поверхности не обнаружено [13].

Возникает вопрос: не проводится ли процесс при температуре выше критической точки. На диаграмме Fe-N критическая температура α - γ превращения 591°C. Провели азотирование при 620°C в течение 28 часов. Получили трехзонный азотированный слой. Снаружи - нитридная корка, переходящая в зернограничную сетку, под ней зона с пониженной твердостью (680-700)HV. Затем нижняя зона с твердостью (830-860)HV, толщиной около $\frac{1}{4}$ от общей толщины слоя со структурой, аналогичной той, что получали при 580°C и 600°C. Очевидно высокое содержание легирующих элементов сдвинуло критическую точку к более высоким температурам [14,15]. За 28 часов азотирования при 620°C получили слой меньшей толщины, чем при 600°C за 20 часов, что подтверждает наличие аустенита в слое при 620°C, в котором диффузионная подвижность азота меньше, чем в α -фазе [16, 17].

Вывод: Таким образом разработан способ деформационно-дисперсионного упрочнения коррозионностойкой безуглеродистой стали, который позволяет выполнить бездефектное азотирование при максимально высокой температуре (600°C) сохраняя прочность выше 980 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.Н. Каблов Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. //Авиационные материалы и технологии 2012. №S. С 7-17.
2. Ю.Н. Шмотин, Р.Ю. Старков, Д.В. Данилов, О.Г. Оспенникова, Б.С. Ломберг Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО "Сатурн"» //Авиационные материалы и технологии 2012. №2 Стр.6-8
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий. Труды ВИАМ. 2013 №2
4. О.Г. Оспенникова, Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий, //Авиационные материалы и технологии 2012 г. №S С 5-19
5. Е.Б. Чабина, Е.В. Филонова, Б.С. Ломберг, М.М. Бакрадзе Структура современных деформируемых никелевых сплавов. // Все материалы. Энциклопедический справочник. - №6, 2012 г.
6. Алемасова А.С., Луговой К.С., Экологическая аналитическая химия, Донецк: ДонНУ, 2010 г.С 34.
7. Влияние скорости нагревания при исследовании фазовых превращений в алюминиевых сплавах методом ДСК, Ю.В. Лощинин, С.И. Пахомкин, А.С. Фокин//Авиационные материалы и технологии 2011, №2. С 11-17
8. Ларин А.Т., Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Карманный справочник, М., Механика. 2008г. С 43.
9. Fang W., Jinshan L., Rui H., Hongchao K. //ChineseJournalofAeronautics. 2008. V. 21. P. 565-570.
10. Е.Н. Каблов, А.Г. Евгенов, Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом автоматизации расплава //Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана //, серия Машиностроение спец. выпуск «Перспективные конструкционные материалы и технологии». 2011. С. 79-87
11. К.В. Варли, Ю.А. Скаков, Я.С. Уманский Физика металлов и металловедение. М., Машиностроение. 1966, т.21, с 779-781.
12. Z.G. Liu, T. Al-Kassab, P. Haasen The atomic structure of A1-B2 interfaces in a NiBe alloy. // ActaMetallurgicaetMaterialia. 2010 – V. 38, №10, P. 1857–1862
13. В.Д. Плахтий, Ю.Д. Тяпкин Металлофизика, М., Машиностроение – 1981, т.3, №3, с. 119-121
14. Z.G. Liu, T. Al-Kassab, P. Haasen The phase separation in a NiBe alloy, as studied by atom probe field ion microscopy. // Surface Science. 1991 – V. 246, № 3, P. 329–335
15. Z. G. Liu, J. G. Zheng, Q. Li, D. Feng The interface structure of the β -precipitates in Ni-12at% Be alloy. //Physica status solidi. 1992 – V. 131, № 2, P. 523–528.
16. С. Ломберг, М.М. Бакрадзе, Е.Б. Чабина, Е.В. Филонова Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей//Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. Стр.25-31

17. **Металловедение и термическая обработка сталей и чугуна: справочное издание в 3-х т./А.В. Супов, В.П. Канаев, П.Д. Одесский и др.; под общей ред. А.Г. Рахштадта, Л.М. Прокошкина, А.В. Супова. Т.3 Термическая и термомеханическая обработка сталей и чугуна. М.: Интермет Инжиниринг, 2007. с 516-520**

Рецензент: Елисеев Эдуард Анатольевич, заместитель начальника лаборатории, кандидат технических наук, ФГУП ВНИИАМГНЦ РФ.

Banas Igor Pavlovich

All-Russian Scientific Research Institute Of Aviation Materials
Russia, Moscow
E-Mail: olegsedov@yahoo.com

Sedov Oleg Vladimirovich

All-Russian Scientific Research Institute Of Aviation Materials
Russia, Moscow
E-Mail: olegsedov@yahoo.com

Korobova Elena Nikolaevna

All-Russian Scientific Research Institute Of Aviation Materials
Russia, Moscow
E-Mail: olegsedov@yahoo.com

Zaytsev Denis Vladimirovich

All-Russian Scientific Research Institute Of Aviation Materials
Russia, Moscow
E-Mail: olegsedov@yahoo.com

Deformation-dispersion hardening stainless steel

Abstract. In the article authors from the practical point of view, is considered important in modern engineering problem of the urgent need for a durable and at the same time corrosion resistant steels. As one of the most simple, effective and widespread in the domestic industry methods of improving the durability of the parts given the nitriding process. In-depth and comprehensive analysis subjected to the consequences of the use of nitriding in relation to a particular stainless steel 05X12H2K3M2AФ. Details how specific modes of heat treatment affect the strength and corrosion resistance. Attention is paid to peculiarities of application of nitriding for small and long parts. Proposed mode of deformation of the dispersion hardening stainless steel 05X12H2K3M2AФ providing heat at extremely high temperature nitriding providing defect-free layer. Gradually shown the causes and consequences of choosing a particular temperature and processing time. Detail the modes of the tests and their results. The results of studies (micro-surveys, electron, detail explained, in part based patterns from certain processing modes and their impact strength properties. Clearly shows the mechanism of hardening. This article is of interest not only to the scientific community, some of the material might be of interest to engineers and technical workers of industrial enterprises and educators involved in the training of specialists for work in the engineering industry.

Keywords: nitriding; haytemperature deformation; strength; hardness; defect; korrosionresistant steel; layer.

REFERENCES

1. E.N. Kablov Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 g. //Aviatsionnye materialy i tekhnologii 2012. №S. S 7-17.
2. Yu.N. Shmotin, R.Yu. Starkov, D.V. Danilov, O.G. Ospennikova, B.S. Lomberg Novye materialy dlya perspektivnogo dvigatelya OAO «NPO "Saturn"» //Aviatsionnye materialy i tekhnologii 2012. №2 Str.6-8
3. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye elementy – materialy sovremennykh i budushchikh vysokikh tekhnologiy. Trudy VIAM. 2013 №2
4. O.G. Ospennikova, Strategiya razvitiya zharoprochnykh splavov i staley spetsial'nogo naznacheniya, zashchitnykh i teplozashchitnykh pokrytiy, //Aviatsionnye materialy i tekhnologii 2012 g. №S C 5-19
5. E.B. Chabina, E.V. Filonova, B.S. Lomberg, M.M. Bakradze Struktura sovremennykh deformiruemyykh nikel'nykh splavov. // Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. - №6, 2012 g.
6. Alemasova A.S., Lugovoy K.S., Ekologicheskaya analiticheskaya khimiya, Donetsk: DonNU, 2010 g. C 34.
7. Vliyanie skorosti nagrevaniya pri issledovanii fazovykh prevrashcheniy v alyuminiyevykh splavakh metodom DSK, Yu.V. Loshchinin, S.I. Pakhomkin, A.S. Fokin//Aviatsionnye materialy i tekhnologii 2011, №2. C 11-17
8. Larin A.T., Konstruktsionnye materialy: metally, splavy, polimery, keramika, kompozity. Karmannyi spravochnik, M., Mekhanika. 2008g. S 43.
9. Fang W., Jinshan L., Rui H., Hongchao K. //Chinese Journal of Aeronautics. 2008. V. 21. R. 565-570.
10. E.N. Kablov, A.G. Evgenov, Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Khodykin A.N. Issledovanie melkodispersnykh poroshkov pripoev dlya diffuzionnoy vakuumnoy payki, poluchennykh metodom avtomizatsii rasplava //Vestnik MGTU im. N.E.Baumana //, seriya Mashinostroenie spets. vypusk «Perspektivnye konstruktsionnye materialy i tekhnologii». 2011. S. 79-87
11. K.V. Varli, Yu.A. Skakov, Ya.S. Umanskiy Fizika metallov i metallovedenie. M., Mashinostroenie. 1966, t.21, s 779-781.
12. Z.G. Liu, T. Al-Kassab, P. Haasen The atomic structure of A1-B2 interfaces in a NiBe alloy. // Acta Metallurgica et Materialia. 2010 – V. 38, №10, P. 1857–1862
13. V.D. Plakhtiy, Yu.D. Tyapkin Metallofizika, M., Mashinostroenie – 1981, t.3, №3, s. 119-121
14. Z.G. Liu, T. Al-Kassab, P. Haasen The phase separation in a NiBe alloy, as studied by atom probe field ion microscopy. // Surface Science. 1991 – V. 246, № 3, P. 329–335
15. Z. G. Liu, J. G. Zheng, Q. Li, D. Feng The interface structure of the β -precipitates in Ni-12at% Be alloy. //Physica status solidi. 1992 – V. 131, № 2, P. 523–528.
16. S. Lomberg, M.M. Bakradze, E.B. Chabina, E.V. Filonova Vzaimosvyaz' struktury i svoystv vysokozharoprochnykh nikel'nykh splavov dlya diskov gazoturbinnnykh dvigateley//Aviatsionnye materialy i tekhnologii. 2011. №2. Str.25-31

17. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka staley i chuguna: spravochnoe izdanie v 3-kh t./A.V. Supov, V.P. Kanaev, P.D. Odesskiy i dr.; pod obshchey red. A.G. Rakhshadta, L.M. Prokoshkina, A.V. Supova. T.3 Termicheskaya i termomekhanicheskaya obrabotka staley i chuguna. M.: Intermet Inzhiniring, 2007. s 516-520