

УДК 621.048.7

Г. А. Сухочев, д-р техн. наук, проф., С. Н. Коденцев, канд. техн. наук, доцент, Е. Г. Смольяникова канд. техн. наук, доцент, В. А. Кашицин, аспирант.

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

E-mail: suhotchev@mail.ru; kodentsev.sergey@mail.ru; sm.evgeniya@gmail.com; benny-grade@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКО-РЕСУРСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье обоснованы возможности повышения эффективности комбинированной упрочняющей обработки поверхностей многократно нагруженных деталей. Выполнен анализ эксплуатационных особенностей физико-механического состояния поверхностей лопаток в коррозионно-активных средах. Предложены возможные комбинации эффективных технологических схем поверхностной обработки для получения эксплуатационно-ориентированных показателей качества лопаточных конструкций применительно к условиям знакопеременных нагрузок в экстремальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: эффективность процесса, упрочнение поверхности, эксплуатационные условия, лопаточные детали, комбинированные воздействия, наклеп

G. A. Sukhochev, A. M. Kadyrmetov, E. G. Smolyannikova, V. A. Kashitsin

IMPROVING THE EFFICIENCY OF HIGH-RESOURCE REINFORCEMENT TECHNOLOGY

The article substantiates the possibilities of increasing the efficiency of combined hardening surface treatment of reusable loaded parts. The analysis of the operational features of the physico-mechanical condition of the blade surfaces in corrosive environments has been performed. Possible combinations of effective technological schemes of surface treatment are proposed to obtain operationally oriented quality indicators of blade structures in relation to alternating loads under extreme operating conditions.

Keywords: process efficiency, surface hardening, operating conditions, blade parts, combined effects, slanting.

1. Введение

Для технологического обеспечения эксплуатационных показателей агрегатов двигательных установок многоназначного назначения необходимо особое внимание обратить на наиболее проблемные агрегаты и их базовые детали с точки зрения эксплуатации в экстремальных условиях. Таким актуальным примером является турбонасосный агрегат, высокооборотный ротор которого насыщен лопаточными конструктивными элементами. Возможности технологического обеспечения ресурса с учетом сложной конструкции лопаточных деталей на высокооборотных режимах, технологически наследованные дефекты от предыдущих операций обработки значительно снижаются негативным влиянием жестких условий работы турбоагрегата при нестационарных нагрузках в работе жидкостно-реактивной двигательной установки [1]. По этой причине создание многоресурсных агрегатов для перспективных ракетных двигателей является сложной конструкторско-технологической задачей. Нетехнологичность конструкции в значительной мере проявляется в ограничении допуска в зону обработки труднодоступных элементов инструментария для промышленной реализации механизированных отделочно-зачистных или упрочняющих технологических операций. Так типовое рабочее колесо турбины высоконапорного турбонасосного агрегата имеет сложную пространственную конфигурацию, эксплуатируется при нестационарных динамических условиях в криогенной среде жидкого водорода. Заготовку конструктивно сложного рабочего колеса турбины получают высокотемпературным синтезом из мелкофракционных порошков сложнолегированного жаропрочного никельсодержащего сплава как монолитный по-

луфабрикат. В процессе формирования проточной части межлопаточных каналов критически важно поддерживать зазор между соседними лопатками на уровне не менее 2 мм. Образование усталостных трещин в конструкции лопаток напрямую связано с воздействием малоцикловых деформаций, возникающих вследствие частотного влияния переменных нагрузок знакопеременного характера. Эти нагрузки дополнительно осложняются периодическими колебаниями рабочего давления в системе.

Особую опасность представляет проникновение водорода в микротрещины, расположенные на поверхности лопатки. Данное явление провоцирует значительное усиление расклинивающего эффекта и ускоряет процессы разрушения материала. В результате в местах концентрации напряжений водородное воздействие приводит к существенному снижению предела прочности конструкции, что критически влияет на её эксплуатационные характеристики. [1].

2. Основное содержание и результаты работы

Анализ характера повреждений, явившихся причиной выхода рабочих колес турбин из строя, выявляет основные виды отказов, к которым относятся: усталостный излом, растрескивание и разрушение кромок лопаток, а также и других конструктивных элементов (рис. 1, 2). При обработке лопатки различными методами в ее поверхностном слое образуется множество разветвленных мелких трещин с выходом на поверхность (рис. 3), содержащих по глубине два участка: верхний h_1 , на котором поля свободной поверхностной энергии одной стороны трещины и другой не перекрываются, а силы молекулярного притяжения между ними не проявляются; нижний h_2 , на котором молекулярные поля одной и другой сторон перекрываются.

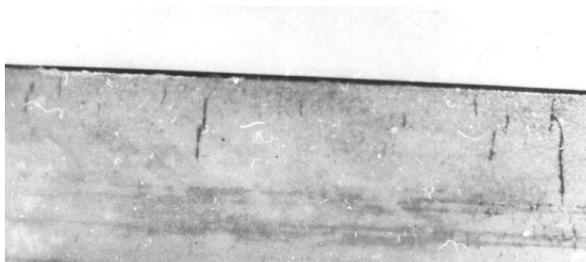


Рисунок 1. Трещиноватый слой на поверхности/под поверхностью детали после ресурсных испытаний

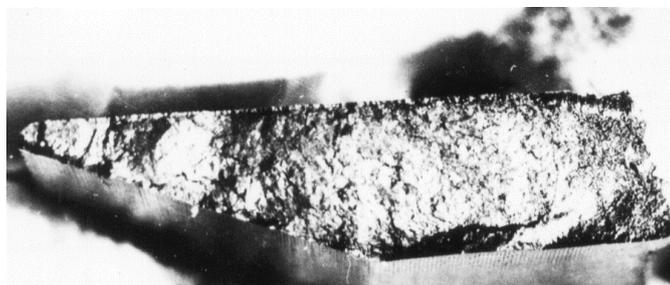


Рисунок 2. Излом усталостного характера

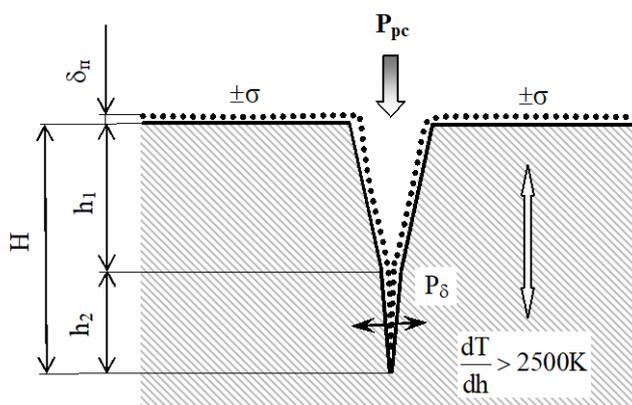


Рисунок 3. Схема участка поверхности с микротрещиной в водородосодержащей среде

В процессе развития дефекта между противоположными стенками трещины возникают специфические явления. Силы молекулярного притяжения проявляются на различных участках трещины, причем их интенсивность возрастает по мере приближения к устью концентратора формирующегося поверхностного или подповерхностного дефекта. При проникновении рабочей среды в полость трещины молекулы оседают на поверхности трещины и эффективно нейтрализуют некомпенсированные электрические поля материала, что приводит к существенному снижению сжимающих напряжений. Эксплуатационные нагрузки создают дополнительное напряжение в устье трещины. Это может привести к разрушению связей между элементами кристаллической решетки, что вызывает дальнейшее распространение трещины внутри лопатки. Процесс усугубляется расклинивающим эффектом от адсорбционных слоев среды, который усиливает нарушение поверхностного слоя материала. Избыточная свободная энергия тонких устойчивых пленок ($E\delta$) демонстрирует резкое увеличение при уменьшении толщины пленки (δn). Это явление обусловлено расклинивающим давлением ($P\delta = -dE\delta/d\delta n$), которое всегда противодействует уменьшению толщины пленки и уравнивается внешними силами.

Особого внимания заслуживает влияние расклинивающего давления со стороны сольватных пленок жидкости и адсорбционных слоев. Эти факторы значительно замедляют процесс смыкания микрощелей, особенно в местах с тупиковыми участками. В некоторых случаях они могут полностью предотвратить смыкание, когда молекулярные силы сцепления в наиболее узких частях микрощелей оказываются недостаточными для вытеснения предельно тонких мономолекулярных и адсорбционных слоев.

При высоком давлении внешней рабочей среды (P_{pc}) расклинивающее давление играет ключевую роль в формировании защитного барьера, препятствующего дальнейшему развитию трещины.

$$P\delta' = -(dE\delta/d\delta n + P_{pc}). \tag{1}$$

Расклинивающее давление в среде водорода:

$$P_{pkH} / P_{pc} = P\delta' = d\{A[(\ln BP_0)^2 - (\ln BRTC_H)^2] / d\delta n\} + P_{pc}, \tag{2}$$

где A и B – безразмерные константы;

P_H – давление адсорбированного водорода;

P_0 – давление водорода при степени покрытия поверхности $Q=0$.

Так как $P_0 < P_H$, при $\ln B = k_{H2}$,

$$P_{pkH} = k_{H2} d(RTC_H)^2 / d\delta_n + P_{pc}. \quad (3)$$

Условие достаточности для уравнивания напряженности поверхностного слоя лопаточной детали в экстремальных условиях:

$$\sigma_{сж} > (\sigma_{\varepsilon \max}^- + P_{pkH}) - \sigma_T, \quad (4)$$

где $\sigma_{\varepsilon \max}^-$ – максимальное растягивающее напряжение, возникающее под действием на деталь эксплуатационных нагрузок и градиента температур.

Выражения (1)–(4) показывают степень взаимного влияния состояния обрабатываемых материалов, газовой и жидкой фаз криогенных сред, градиентов температур, а также зависимость эксплуатационных показателей от основных факторов: механических свойств поверхностного слоя материала лопаточной детали и характеристик микроуглублений в зоне концентратора напряжений. В этом случае повышение долговечности и безотказности нагруженных лопаточных деталей и транспортных машин в целом решается технологическими методами. Анализ технологических возможностей различных методов и средств технологического оснащения, а также учет явлений технологической наследственности от предшествующих этапов обработки позволяют установить критерии выбора наиболее эффективного комбинированного метода или комбинации последовательно применяемых способов поверхностной обработки применительно к конструктивным особенностям каналов и условиям работы (таблица 1).

Выбор оптимальных режимов упрочняющей обработки, обеспечивающих стабильность эксплуатационных показателей поверхностного слоя канала малого сечения, проводится с учетом условия достаточности для уравнивания напряженного состояния поверхностного слоя лопаточной детали в критичных условиях эксплуатации [1]:

$$\sigma_{сж} > (\sigma_{\varepsilon \max}^+ + \sigma_{раск}) - \sigma_T, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где $\sigma_{\varepsilon \max}^+$ – максимальное растягивающее напряжение на поверхности, возникающее под действием на деталь эксплуатационных нагрузок и градиента температур; $\sigma_{раск}$ – напряжение от действия расклинивающего эффекта в микротрещинах поверхности от адсорбционных слоев среды; σ_T – предел текучести материала.

Количество циклов до начала образования трещин зависит от величины растягивающего напряжения и упругопластической деформации в зоне концентратора напряжений, которые в свою очередь напрямую зависят от пластичности материала и величины дефекта на поверхности лопатки. Таким образом, задача повышения ресурса работы лопаточной детали сводится к получению равномерного наклепа и остаточных напряжений сжатия по всему профилю межлопаточного канала при условии отсутствия дефектов поверхностного слоя лопаток. Повышение эффективности работы насосного оборудования в определяющей степени зависит от стабильности микрогеометрии и величины шероховатости проточной части, то есть межлопаточных каналов. Правильный выбор способов технологического обеспечения эксплуатационных характеристик в соответствии с разработанными рекомендациями (таблица 1) необходим для исключения возможности перенаклепа поверхности детали, который осуществляется при следующем условии, аналогично приведенному в [1]:

$$\sigma_{сжмах} + \sigma_{эмах} + \sigma_{раск} \geq \sigma_m, \text{ МПа}, \quad (6)$$

где $\sigma_{эмах}$ – максимальное напряжение сжатия, возникающее под действием на деталь эксплуатационных нагрузок.

С учетом требований (2) условие, исключаящее этот перенаклеп:

$$\delta_{об} < \delta_{обкр}, \text{ мм},$$

где $\delta_{обкр}$ – критическая величина прогиба контрольного образца, соответствующая началу формирования технологического или эксплуатационного перенаклепа поверхности:

$$\delta_{обкр} = 0,008(\sigma_T - \sigma_{эмах} - \sigma_{раск}) \left(1 - 0,555 a_{ндет}\right) \frac{a_{ндет}}{k_E k_\delta}, \text{ мм}; \quad (7)$$

где $k_E = E_{дет}/E_{об}$ – коэффициент, учитывающий соотношение модулей упругости материалов детали и образца; $k_\delta = \delta_{обдет}/\delta_{обк}$ – коэффициент, численно равный отношению прогибов обработанных в одинаковых условиях образцов из материалов детали и контрольного материала; $a_{ндет}$ – глубина наклепа материала детали.

При использовании классических методик дробеструйной обработки в условиях значительных нагрузок возникали нежелательные эффекты, связанные с формированием поверхностных сдвиговых деформаций [2]. В качестве альтернативы для комплексной обработки криволинейных проточных каналов лопаточных элементов с наружным бандажом разработана инновационная технология импульсно-ударного упрочнения.

Принцип данной методики заключается в прерывистом импульсном перемещении гранулированного обрабатываемого материала через межлопаточные каналы при воздействии низкочастотных вибраций [3]. Такой подход позволил эффективно управлять процессом обработки каналов, обеспечивая равномерное упрочнение и высокое качество поверхностного слоя. Были созданы специализированное оборудование и оснастка для реализации данной технологии.

Однако практический опыт применения показал, что метод не всегда гарантирует равномерное распределение наклепа и требуемую шероховатость поверхности в сужающихся криволинейных межлопаточных пространствах с углом раскрытия менее 45° [1].

Для расширения технологических возможностей процесса была создана комбинированная методика, объединяющая механическое импульсно-ударное воздействие металлических гранул с процессом локального анодного растворения вершин микронеровностей. Это существенно увеличило интенсивность обработки [4]. Такой подход обеспечивает равномерное уменьшение высотных параметров шероховатости по всей глубине криволинейного сужающегося межлопаточного канала.

Ключевые показатели качества, влияющие на эксплуатационные характеристики лопаточных элементов при упрочнении непрофилированным инструментом (гранулами), включают:

- снижение среднего отклонения профиля Ra;
- степень наклепа УН;
- глубину наклепа поверхностного слоя ан;

- толщину трещиноватого слоя h_t ;
- величину и характер распределения остаточных напряжений $\sigma_{ост}$;
- равномерность изменений по поверхности лопатки.

При этом простая инструментальная фиксация отдельных показателей качества не даёт полного представления о комплексном механизме технологического обеспечения эксплуатационных характеристик лопаточных деталей и агрегатов на их основе.

Комплексное влияние достигнутых показателей качества на наиболее важные эксплуатационные показатели, такие, как КПД, определяется гидравлическими расходными испытаниями, а ресурс работы поверхности лопатки выявляется при разгонных испытаниях турбин в технологических имитаторах ротора.

Обеспечение необходимых показателей качества открытых поверхностей деталей технических трудностей на представляет. В нашем случае под качеством отделочно-упрочняющей обработки лопаточных деталей подразумевается качество обработки закрытых поверхностей – межлопаточных каналов, определяющее эксплуатационные характеристики таких деталей. Основные факторы, существенно влияющие на качество обработки поверхностей межлопаточных каналов, исходя из возможности практического воздействия условий обработки на вышеуказанные показатели качества, подразделяем на группы неуправляемых и управляемых/управляющих факторов (рисунок 4).

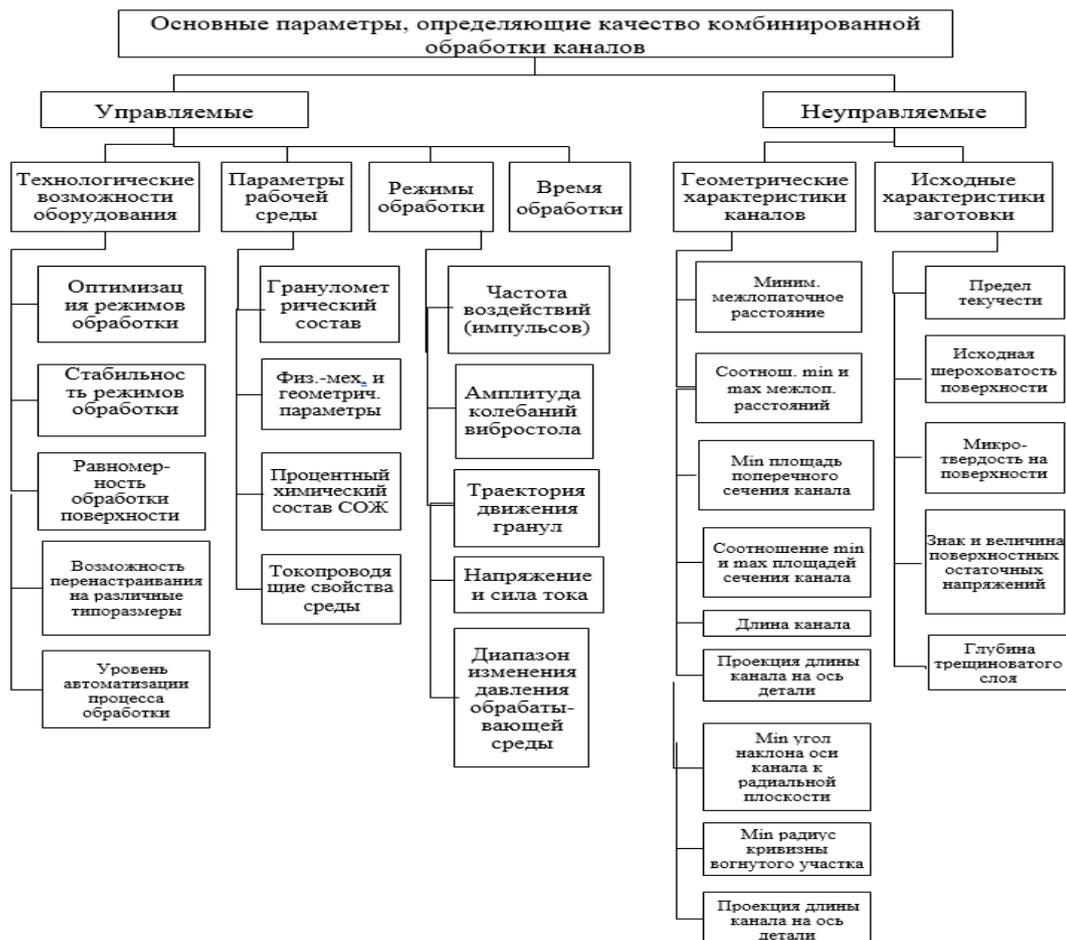


Рисунок 4. Основные факторы, влияющие на качество обработки поверхностей лопаток

Факторы, влияющие на качество обработки, структурированы в виде групп, каждая из которых включает подгруппы с однородными элементами по характеру их воздействия на конечный результат. Управляемые факторы представляют собой ключевые параметры, позволяющие целенаправленно корректировать условия обработки для достижения требуемого качества. Их особое значение заключается в том, что они не просто поддаются регулированию, но и выступают в роли управляющих элементов при выполнении операций по упрочнению поверхностей межлопаточных каналов.

Для достижения максимальной эффективности процесса упрочнения критически важно провести комплексную оптимизацию всех взаимосвязанных управляемых и управляющих факторов. При этом необходимо учитывать конструктивные и технологические особенности конкретных деталей, а также энергетический баланс всех компонентов комбинированного процесса. Реализация оптимальной настройки каждой подгруппы управляемых факторов требует разработки специального оборудования и технологической оснастки, обладающей необходимыми характеристиками для успешного проведения комбинированных операций. Важнейшие параметры такого оборудования отражены в таблице 1.

Ключевые подгруппы управляемых факторов:

- характеристики рабочей среды;
- параметры режима обработки;
- продолжительность технологического процесса.

Для эффективной настройки этих параметров требуется проведение как теоретических исследований, так и практических экспериментов, направленных на изучение закономерностей комбинированного процесса обработки в специфической зоне межлопаточного пространства детали.

Таблица 1. Способы обработки поверхностей межлопаточных каналов

Типовая лопаточная деталь	Минимальное межлопаточное расстояние, $b_{k \min}$, мм	Угол видимости труднодоступных поверхностей, φ_{\max} , град.	Способ получения лопаток	Наследованная шероховатость, R_a , мкм	Основной эксплуатационный показатель	Определяющий показатель качества поверхности	Наиболее эффективный метод поверхностной обработки межлопаточных каналов
1	2	3	4	5	6	7	8
Турбина компрессора	20–60	≥ 45	Литье	15–20	КПД	R_a	Струйно-абразивный
Крыльчатка насоса с открытыми каналами			Литье	20–40			Виброабразивный

Продолжение таблицы 1

			Фрезерование	10–15			Виброабразивный + струйнодинамический
Колесо турбины компрессора	10–30	<45	Литье	15–20	Ресурс КИД	$\sigma_{ост}, U_H, R_a$	Виброабразивный + виброударный
Крыльчатка с закрытыми каналами		<30	Литье	10–30	КИД Ресурс	$R_a, \sigma_{ост}, U_H$	Виброударный + струйно-динамический
	ГИП		20–40	Импульсно-ударный			
Колесо турбины с закрытыми каналами	5–10	<30	Литье	20–50	Ресурс КИД	$\sigma_{ост}, U_H, R_a$	Комбинированное импульсно-ударное экструдирование
	2–5		<45	ЭФО			5–10

3. Заключение

Сравнение результатов комбинированной обработки с возможностями других, ранее освоенных технологических методов по обеспечению параметров качества поверхностного слоя лопаток на типовых образцах натуральных деталей приведено в таблице 2.

Таблица 2. Результаты отделочно-упрочняющей обработки каналов турбины по различным технологическим схемам

Показатель качества обработки	Способ обработки (комбинация способов)			
	Виброшлифование	Виброшлифование + струйно-динамическая обработка	Виброударное экструдирование	Магнитоимпульсная обработка + анодное растворение
Микротвердость, МПа	3200	3500	3500	4100
Изменение микротвердости, МПа	200	400	400	990
Степень наклепа, %	8	17	18	25
Глубина наклепа, мм	0,025	0,045	0,05	0,06
Параметр шероховатости R_a , мкм	2,7	2,1	1,7	1,1
Глубина микротрещин, мкм	5,5	3,5	2,2	1,0

После завершения опытно-технологических работ намеченный комплекс мероприятий позволит достигнуть:

- стабилизации показателей качества лопаточных деталей, что позволит поднять наработку на отказ более чем в 2 раза, снизить потери от переборок турбонасосных агрегатов до 300% в процессе контрольно-технологических испытаний;
- повышения качества, надежности и безотказности изделий в целом до 20–с учетом условий эксплуатации, позволяя снизить материальные затраты на устранение

нештатных ситуаций и отказов раза, повысить производительность при изготовлении и технологических испытаниях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сухочев Г. А. Технологические методы повышения эксплуатационных показателей транспортных машин в экстремальных условиях / Г. А. Сухочев // Техника машиностроения. 2005. № 3. С. 52–54.

2. Небольсин Д. М. Технологические параметры комбинированной струйно-динамической обработки внутренних поверхностей / Д. М. Небольсин, Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев, Е. Г., Смольяникова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 5. – С. 41–46.

3. Патент №2788444 Российская Федерация, В23Н 5/06, В23В 09/00. Способ упрочнения внутренних поверхностей каналов деталей / Г. А. Сухочев, А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, С. Н. Подгорнов, Д. В. Силаев; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. № 2022100797, заявл. 25.05.20219; опубл. 19.01.2023, Бюл. №2. 8с.

4. Грымзин А. Ю. Технологическое обеспечение показателей качества поверхностей проточных каналов / А. Ю. Грымзин, Г. А. Сухочев // Насосы. Турбины. Системы. 2022. № 1 (42). С. 31-37.

6. Янюшкин А. С., Архипов П. В., Торопов В. А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов// Вестник машиностроения. 2009. №3. С.62-69.

Поступила в редколлегию 09.04.2025 г.