

К.Ф.Митряев, М.Б.Сазонов

ПОВЫШЕНИЕ ВЫНОСЛИВОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД  
РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ  
КОМБИНИРОВАННОЙ УПРОЧНЯЮЩЕ-ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Приведены результаты графоаналитического анализа напряженного состояния в пера лопаток компрессора ГТД из сплава ВТ9, учитывающие остаточные напряжения и напряжения от рабочих нагрузок в процессе эксплуатации. Показана возможность повышения предела выносливости лопаток за счет оптимизации эпокс остаточных напряжений путем совершенствования финишной упрочняюще-отделочной технологии с использованием микрошариков.

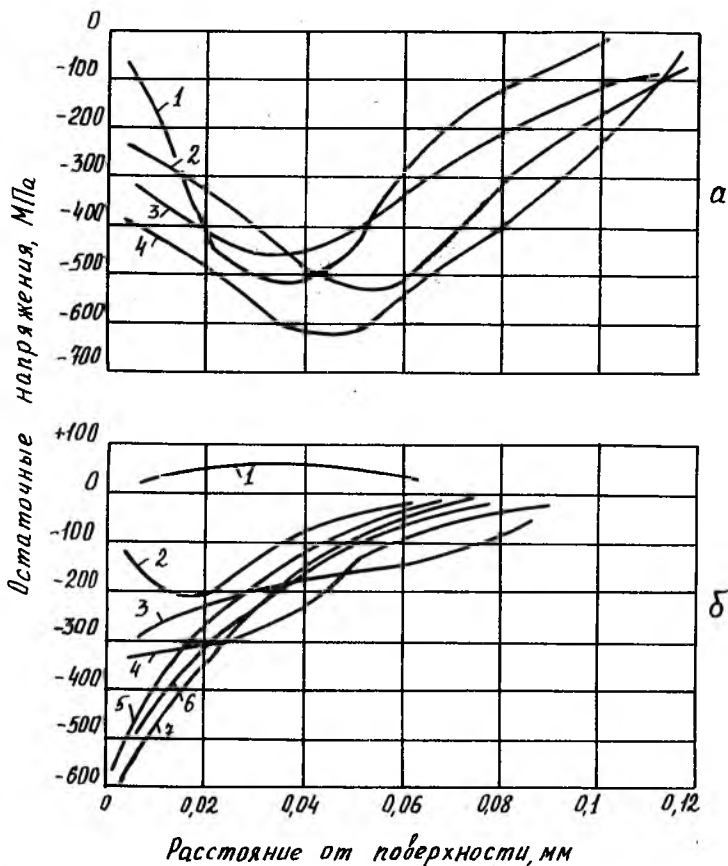
Чтобы повысить выносливость, ресурс и надежность работы лопаток компрессора газотурбинных двигателей, работающих при высоких циклических и статических нагрузках, а также подвергающихся воздействию тепла и эрозионной среды, необходимо при изготовлении обеспечить оптимальное упрочнение поверхностного слоя с наведением в нем необходимого уровня и глубины распространения сжимающих остаточных напряжений, получить шероховатость поверхности, соответствующую 9-10 классам и равномерный микрорельеф с большими шаговыми параметрами и радиусами впадин. Эта задача решается применением комбинированной упрочняюще-отделочной обработки.

При выборе метода и режима упрочняющей обработки необходимо учитывать нагрузки и фактическое напряженное состояние лопаток в процессе работы, изменение его во времени. При этом надо также принимать во внимание тонкие сечения пера лопаток, острые кромки, являющиеся концентраторами напряжений.

Существующие технологические процессы финишной обработки лопаток компрессора наиболее широко включают в себя после полирования гидродробеструйную обработку (ГДО) стальными шарами диаметром 2,0-2,5 мм с последующим виброупрочнением (ВУ), виброобработкой

на дисбалансных установках (ВУД) или виброшлифованием (ВШ), гидроталповкой дробью диаметром 0,6–1,0 мм (ГД), ультразвуковым упрочнением шарами 2–3 мм (УЗУ). При таких видах обработки шероховатость обеспечивается с  $R_a$  в пределах 0,4–0,08 мкм в зависимости от режима и вида отделки. В поверхностном слое толщиной 150–250 мкм происходит упрочнение до 20–30% в зависимости от материала лопатки, и формируются сжимающие остаточные напряжения до 400–600 МПа с подслоинным максимумом на глубине 40–60 мкм [1, 2]. Напряжения ближе к поверхности спадают до 100–400 МПа (рис. 1). Эти методы обработки позволяют обеспечить значительное повышение предела выносливости тонкостенных деталей, что подтверждено усталостными испытаниями круглых образцов из сплава ВТ9 с диаметром рабочей части 5 мм [1]. Однако они сопровождаются большой ударной нагрузкой, глубоким упрочнением и часто наблюдающимся расклевом кромок, в особенности на тонких лопатках компрессора среднего (КСД) и высокого давления (КВД). Последующая зачистка кромок полированием полностью не исправляет этот дефект. Кроме того, при полировании возможны местные ожоги, происходит снижение сжимающих остаточных напряжений и даже образование растягивающих. При достаточно мощных эпюрах остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое в сердцевине лопаток и кромок образуются высокие реактивные растягивающие напряжения, которые могут стать причиной ускоренного зарождения очага усталостной трещины внутри лопатки.

Практика показала, что разрушение лопаток в процессе эксплуатации носит усталостный характер. Из комплекса качественных характеристик поверхностного слоя, оказывающих влияние на сопротивление усталости, одно из главных мест отводится напряженному состоянию этого слоя в условиях эксплуатации. Поэтому при оптимизации технологического процесса финишной обработки пера лопаток напряженному состоянию должно быть уделено особое внимание. Напряженное состояние в процессе эксплуатации складывается от действия рабочих нагрузок постоянных растягивающих центробежных сил  $F$ , циклических изгибающих моментов  $M$ , а также внутренних технологических (остаточных) напряжений. Допустимый уровень напряжений определяется прочностными и пластическими свойствами материала лопаток, их конструктивными особенностями и режимом работы. Этот уровень можно существенно регулировать величиной и формой эпюры остаточных напряжений, которые в области упругого состояния материала алгебраически сум-



Р и с. 1. Остаточные напряжения в образцах из сплава ВТ9 после различных видов обработки: 1 - ВУ; 2 - ГДО; 3 - ГДО + ВУ; 4 - УЗУ (а); 1 - ВКПАЛ; 2 - полирование; 3 - ОМШ + ВКПАЛ; 4 - ОМШ + ВШ; 5 - ОМШ + ВУ; 6 - ОМШ + ВУД; 7 - ОМШ (б)

мируются с рабочими напряжениями, изменяя их величину. Это особенно важно при циклических нагрузках, когда при наличии остаточных напряжений сжатия цикл становится асимметричным с уменьшением амплитуды растягивающих напряжений.

Известна зависимость между пределом выносливости и остаточными напряжениями [3]:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-100\alpha} - c\sigma_{ост}, \quad (I)$$

где  $\sigma_{-100\alpha}$  — предел выносливости полированных образцов, без наклепа и остаточных напряжений;

$\sigma_{ост}$  — максимальные остаточные напряжения в поверхностном слое;

$c$  — коэффициент, изменяющийся в пределах 0,1–0,35 в зависимости от пластических свойств материала и формы образцов (большие значения относятся к закаленным сталям и титановым сплавам).

Как видно из зависимости (I), для повышения предела выносливости деталей необходимо увеличивать уровень остаточных напряжений, наибольшая величина которых по разным источникам может задаваться в пределах (0,5–1,2)  $\sigma_{\pi}$ . При выборе этого значения необходимо учитывать форму и размеры детали, возможные концентрации напряжений.

Как показали исследования [2, 4], поднять уровень напряжений сжатия и приблизить их максимум к поверхности, обеспечив при этом непревышение заданной величины растягивающих напряжений в сердцевине, возможно за счет применения для упрочнения поверхности обработки микрошариками (ОМШ).

При ОМШ диаметром 160–300 мкм титанового сплава ВТ9 со скоростями 45–50 м/с в течение 180–300 с происходит упрочнение поверхностного слоя толщиной 60–120 мкм, при этом в нем формируются остаточные напряжения сжатия с максимумом у поверхности до 700 МПа, которые по глубине снижаются с большим градиентом. Однако уровень шероховатости при этом повышается с  $R_a = 0,15$ –0,20 до  $R_a = 0,6$ –1,3 мкм, что не отвечает требованиям чертежа лопаток. Поэтому для снижения шероховатости после ОМШ рекомендована дополнительная отделочная обработка. Для лопаток компрессора низкого давления (КНД)

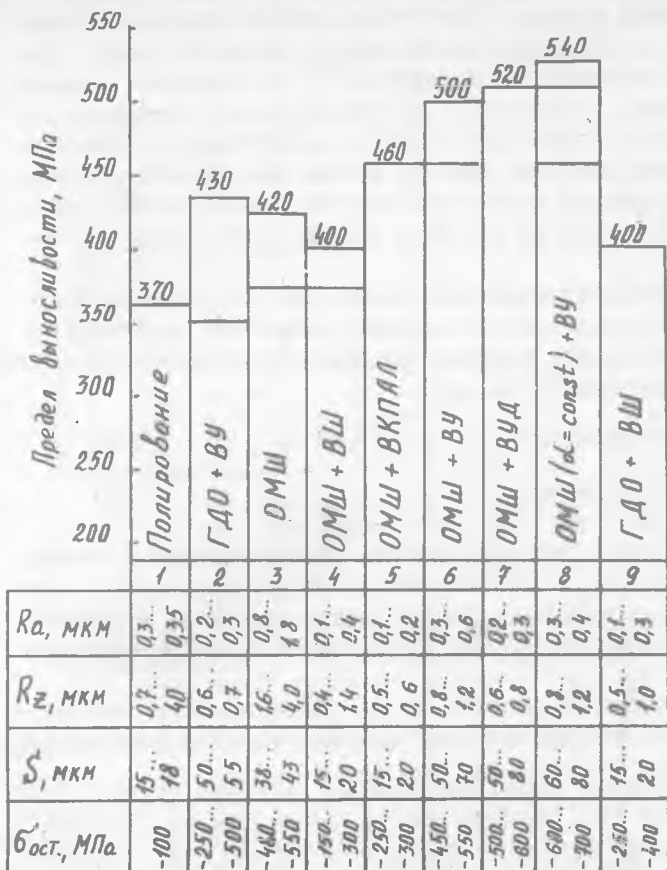
и КСД с шероховатостью  $R_a = 0,4-0,2$  мкм можно использовать ВУ, ВШ и ВУД для КВД – виброконтактное полирование абразивной лентой (ВКПАЛ) или ВУД керамическими гранулами, обеспечивающие шероховатость  $R_a = 0,2-0,1$  мкм. Кроме того, обработки ВУ и ВУД позволяют дополнительно увеличивать шаговые параметры  $S$  и  $S_m$ , сделать микрорельеф более плавным. Обработка ВУ также повышает уровень остаточных напряжений сжатия, в то время как при ВШ и ВКПАЛ он несколько снижается.

Для установления влияния режимов ОМШ в сочетании с различными методами отделочной обработки на сопротивление усталости лопаток компрессора были проведены испытания специальных профильных образцов [I] с тонкими прямоугольными сечениями  $12 \times 1$  мм на электродинамическом вибраторе с частотой 190 Гц. На рис. 2 приведены пределы выносливости образцов из сплава ВТ9, полученные на базе  $N = 2 \cdot 10^7$  циклов. Из рисунка видно, что при упрочнении по технологиям ГДО + ВУ и ГДО + ВШ, несмотря на достаточно высокий уровень сжимающих остаточных напряжений и благоприятный микрорельеф, предел выносливости повышается незначительно и колеблется в интервале 350–400 МПа. Разрушение начиналось с кромок, которые после упрочнения не зачищались.

Обработка только микрошариками на оптимальном режиме ( $v = 47$  м/с,  $\tau = 3$  мин) повышает предел выносливости до 380–420 МПа. Невысокий уровень предела выносливости обусловлен повышенной шероховатостью.

Применение ОМШ + ВШ повышает  $\sigma_{-1}$  незначительно, до 380–400 МПа. В этом случае, хотя шероховатость поверхности снижается почти на 2 класса, одновременно значительно уменьшаются сжимающие остаточные напряжения на поверхности до 300 МПа вследствие удаления при ВШ тонкого поверхностного слоя с высоким уровнем остаточных напряжений. Кроме того, на поверхности с помощью электронного микроскопа замечены отдельные риски от действия абразивных гранул, которые играют роль концентраторов напряжений.

Наиболее существенно, до 160 МПа, повышается предел выносливости при ОМШ + ВКПАЛ (за счет снижения шероховатости до  $R_a = 0,1-0,2$  мкм, сохранения о.н. на уровне 250–300 МПа) и до 500–540 МПа при ОМШ + ВУД и ОМШ + ВУ (за счет повышения остаточных напряжений до 500–700 МПа, снижения шероховатости до  $R_a = 0,2-0,4$  мкм, получения благоприятного микрорельефа и отсутствия отдельных рисков).



Р и с. 2. Влияние различных видов упрочняюще-отделочной обработки на предел выносливости и характеристики качества поверхностного слоя профильных тонкостенных образцов из сплава ВТ9 (верхние границы выносливости соответствуют образцам, обработанным при упрочнении с притенением кромок)

Весьма эффективным мероприятием при динамическом упрочнении образцов стальными шариками (ГДО и ОМШ) является прикрытие (притенение) кромок, которые при вращении лопаток находятся более длительное время под воздействием рабочих тел. Это позволяет выровнять их упрочнение в сравнении с другими участками поверхности, исключить расклеп под действием прямых и секущих ударов. Применение притенения кромок позволило повысить предел выносливости образцов при ГДО + ВУ с 350–380 до 450 МПа, при ОМШ – с 380 до 420 МПа, при ОМШ + ВКПАЛ – с 430 до 450 МПа и при ОМШ + ВУ – с 450 до 500–540 МПа.

На основании вышеприведенных данных (рис. 3) построены зависимости предела выносливости от величины остаточных напряжений у поверхности (рис. 3,а) и величины максимальных напряжений (рис. 3,б), которые можно представить в виде

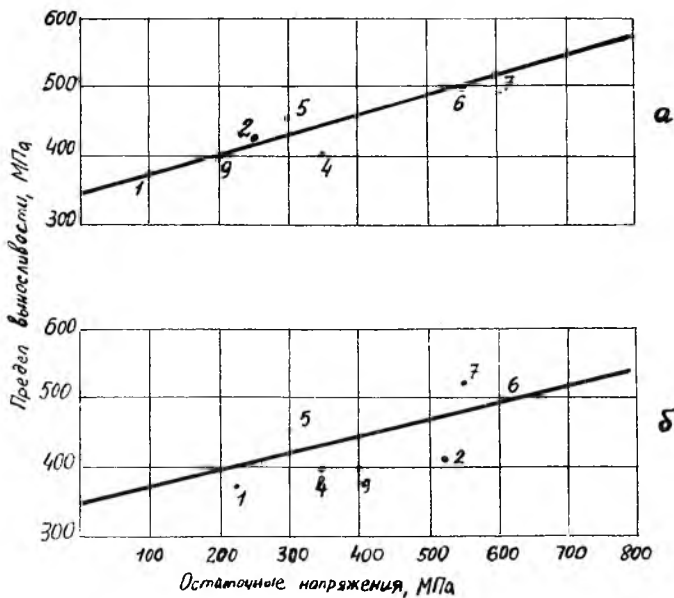
$$\sigma_{-1} = 350 - 0,31 \sigma_{ост. пов} \quad (2a)$$

$$\sigma_{-1} = 350 - 0,25 \sigma_{ост. макс.} \quad (2б)$$

В первом случае (рис. 3,а) разброс данных значительно меньше, а коэффициент при  $\sigma_{ост}$  больше, чем во втором (рис. 3,б). Это свидетельствует лишний раз о том, что эпюры остаточных напряжений с максимумом у поверхности более благоприятны для увеличения предела выносливости.

Повышение уровня напряжений сжатия у поверхности до наибольшего допустимого значения является резервом повышения выносливости лопаток.

На рис. 4 показан анализ напряженного состояния рабочей лопатки 3-й ступени КНД, изготовленной из сплава ВТ9, без рабочей нагрузки и при воздействии на лопатку центробежной силы и изгибающего момента, возникающего при колебаниях пера лопатки. Напряжения определялись в продольном сечении пера у входной кромки с радиусом  $r = 0,38$  мм и толщиной  $H = 0,76$  мм (рис. 4,а) по методике И.А.Биргера для пластин [5]. Как видно из рис. 4 после обработки пера по технологии ГДО + ВУД в лопатке без нагрузки (рис. 4,в) имеют место сжимающие остаточные напряжения в слое толщиной 0,24 мм. Максимум напряжений 450 МПа находится на глубине 0,08 мм, у поверхности они снижаются до 300 МПа. Таким образом, уровень напряжений

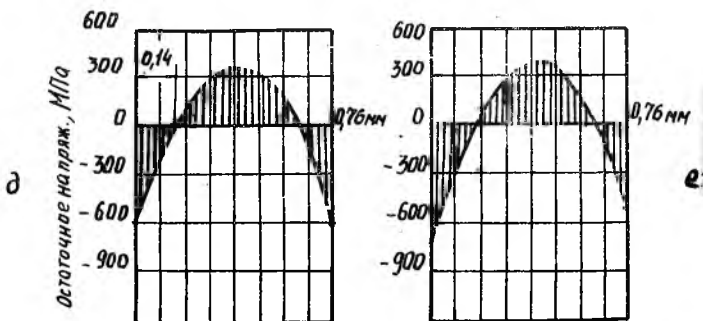
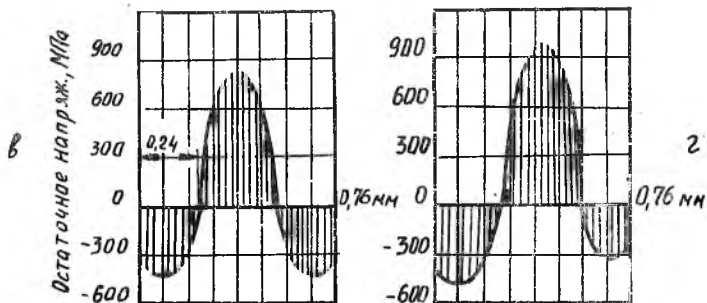
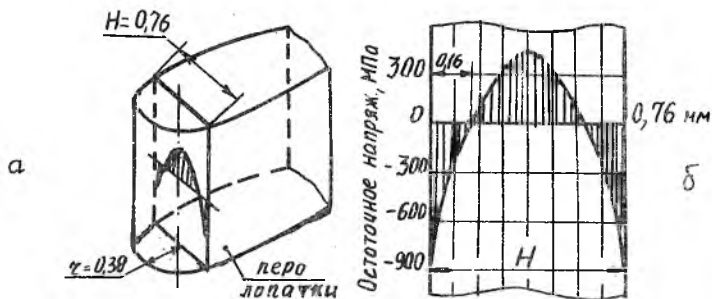


Р и с. 3. Зависимость предела выносливости тонкостенных образцов из сплава ВТ9 от остаточных напряжений у поверхности (а) и максимальных напряжений (б). Номера точек соответствуют видам обработки

еще далек от предельных значений (850–1000 МПа), в то же время в сердцевине растягивающие напряжения достигают 850 МПа. Эпюра напряжений симметрична. С учетом рабочих нагрузок напряжения на поверхности остаются на прежнем уровне (рис. 4, г), в то время как в сердцевине они возрастают до 1000 МПа и приближаются к пределу текучести на растяжение ( $\sigma_T = 1050$  МПа). Такое распределение напряжений является явно неблагоприятным. Очаг усталостной трещины может возникнуть и под поверхностью. Предел выносливости при частоте колебаний  $f = 1200$  Гц, составляет 500 МПа и может быть увеличен для ВТ9.

Из анализа этих данных можно сделать вывод, что на поверхности лопаток напряжения сжатия необходимо повышать, а в сердцевине – снижать за счет уменьшения толщины упрочненного слоя. Желаемая расчетная эпюра остаточных напряжений  $\sigma$  приведена на рис. 4, б, она описывается параболической зависимостью вида





Р и с. 4. Напряжения в перо рабочей лопатки 3-й ступени КВД: а - место определения о.н.; б - оптимальная расчетная эпюра о.н.; в, 2 - эпюры о.н. после обработки ГДО + ВУД; д, е - эпюры о.н. после обработки ОМИ + ВУД

$$\sigma = \sigma_{max} \left( \frac{b}{H^2} x^2 - \frac{b}{H} x + 1 \right),$$

где  $\sigma_{max}$  о.н. у поверхности,  $x$  — расстояние от поверхности.

Расчетная эпюра (рис. 4,б) отличается от реальной (рис. 4,в) допустимым уровнем сжимающих о.н. с максимумом у поверхности (до 900 МПа), с небольшой толщиной (до 0,16 мм) упрочненного слоя и невысокими (380–400 МПа) растягивающими напряжениями в сердцевине.

Применение обработки ОМШ + ВУД позволило получить эпюру о.н., близкую к расчетной (рис. 4,д), с максимумом о.н. у поверхности до 600 МПа и с учетом рабочих нагрузок (рис. 4,е) до 670 МПа. За счет этого предел выносливости лопаток повысился до 540 МПа (на 8%). Как видим, дальнейшее приближение эпюры к оптимальной может дать дополнительное увеличение предела выносливости.

Аналогичная картина получена и в рабочей лопатке 7 ступени КСД. Замена технологического процесса ГДО + ВШ на ОМШ с притенением кромок и последующим ВУД позволило повысить предел выносливости с 480 до 520 МПа. Здесь также не исчерпаны имеющиеся резервы повышения выносливости с помощью увеличения о.н. у поверхности.

Таким образом, за счет оптимизации напряженного состояния лопаток с учетом рабочих нагрузок путем совершенствования технологических процессов упрочняюще-отделочной обработки лопаток можно дополнительно повысить предел выносливости лопаток компрессора, их ресурс и надежность работы.

#### Библиографический список

1. М и т р я е в К.Ф., К р и в е н к о М.П., С а з о н о в М.Б. Влияние упрочняющей обработки микрошариками на усталостную прочность образцов из сплава ВТ9 //Высокоэффективные методы обработки резанием жаропрочных и титановых сплавов: Сб.науч.тр. /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1982. С. 54–59.

2. К у з н е ц о в Н.Д., Ц е й т л и н В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976. 212 с.

3. К р а в ч е н к о Б.А., М и т р я е в К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1968. 132 с.

4. М и т р я е в К.Ф., С а з о н о в М.Б., К р и в е н к о М.П. Влияние упрочняющей обработки микрошариками на наклеп и остаточные напряжения титановых сплавов //Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов: Сб.науч.тр. /Уфимский авиац. ин-т. Уфа, 1982. С. 161-167.

5. Б и р г е р И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. С. 95-102.

УДК 543.42:621.45-226.2

И.Л.Шитарев, Ю.Н.Краснов

ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ  
И СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК,  
ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ШТАМПОВКОЙ

Для определения качества материала лопаток, полученных методом высокоскоростного выдавливания, исследовались химический состав, макро- и микроструктура, механические свойства. Исследования показали, что механические свойства лопаток соответствуют ТУ; микроструктура, величина и характер распределения остаточных напряжений соответствуют нормам.

Для определения качества материала лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки (ВСШ), исследовались химический состав, макро- и микроструктура, механические свойства. Исследования показали, что химический состав материала всех исследованных лопаток, определяемый спектральным и химическими анализами соответствуют ТУ для стали УИ96Ш, а макроструктура плотная, без наличия дефектов.

Микроструктура материала штамповок представляет собой сорбит, ориентированный по мартенситу. Механические свойства материала определялись на стандартных разрывных и ударных образцах, вырезанных из замков термообработанных штамповок. В табл. I представлены средние значения механических свойств.

---

ISBN 5-230-16902-8. Методы обработки авиаматериалов. Самара, 1991

---