

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.88.084+621.787

DOI: 10.30987/article_5d10851eda9a19.64369355

С.В. Шишкин

ПРИМЕНЕНИЕ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ АЛМАЗНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

Приведены результаты экспериментальных исследований по повышению статической и усталостной прочности соединений с натягом. В качестве прогрессивной технологии опробована отделочно-упрочняющая обработка контактных поверхностей деталей в виде нанесения регулярных

микрорельефов при различных схемах алмазного выглаживания.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка, алмазное выглаживание, несущая способность, соединения с натягом, вал, втулка, регулярный микрорельеф.

S.V. Shishkin

APPLICATION OF FINISH-STRENGTHENING PROCESS WITH DIAMOND SMOOTHING FOR BEARING CAPACITY INCREASE OF JOINTS WITH TIGHTNESS

The test results of stress joints with a regular micro-relief with the purpose of the assessment of their operation properties increase at finish-strengthening are shown. Thus, shaft endurance in insertions increases at relief application on the surface of a bush hole. It is explained with the pressure concentration decrease caused by a fit at the expense of the growth of joint contact flexibility. A similar effect is achieved at the creation of an artificial camber of a surface with the purpose of obtaining a characteristic diagram of a contact load distribution. The formation of a regular relief on the shaft surface results in, besides strengthening, the insignificant increase of the fatigue strength in joints.

The static strength increase in stressed joints with the regular micro-relief is explained by the contact interaction character of an unevenness at a cross assemblage and by the increase of an actual contact area at mechanical pressing-in. At that at reassemblies it

was observed a lesser decrease of their strength. A sharp increase of bearing capacity is typical for the mating at a balance of micro-relief high-step parameters on contact surfaces of a shaft and a bush. The results obtained lead to the idea of the creation of joints like threaded or splined joints at transferring an axial load or a rotational moment.

At the relief formation at the expense of some metal extrusion in overflows there is a raising of a surface "plateau" which is used for tightness increase of loose connections and also for rejects correction during manufacturing parts.

In such a way the application of efficient technologies of regular micro-relief coatings along with strengthening increases considerably fatigue and static strength in joints with tightness.

Key words: finish-strengthening processing, diamond smoothing, bearing capacity, joints with tightness, shaft, bush, regular micro-relief.

В машиностроении широко используются посадки с натягом. Обычно необходимость их применения диктуется условиями сборки узла, конструктивными особенностями и размерами деталей, их центрированием и взаимной фиксацией, а также эксплуатационной нагрузкой.

Несущая способность напряжённых соединений тесно связана с контактной нагрузкой и её концентрацией. Давление на контакте определяется натягом, а также механическими свойствами и размерами деталей [1]. Однако для получения задан-

ной величины натяга требуется высокая точность выполнения посадочных поверхностей. Его же величина не всегда однозначна, так как зависит от чистоты обработки контактных поверхностей [2].

Задача усиления статической прочности при передаче крутящего момента или осевой нагрузки, как правило, решается за счёт увеличения натяга соединения. Но при осевой запрессовке это может привести к повреждению контактных поверхностей деталей в виде глубоких царапин и надиров металла. Поперечная же сборка с

нагревом охватывающей детали или охлаждением охватываемого тела не всегда возможна из-за нарушения их работоспособности или нецелесообразна - в связи с технологическими сложностями её выполнения. Кроме того, величина натяга ограничена условием появления пластической деформации [1].

Одним из факторов, определяющих усталостную прочность напряжённых соединений, является концентрация напряжений от посадки, возникающая по границам контакта [3]. Даже незначительные отклонения формы сопрягаемых поверхностей от цилиндричности в виде конусности или вогнутости приводят к увеличению коэффициента концентрации (их выпуклость даёт обратный эффект) и нарушению сплошности контакта, что служит причиной снижения как выносливости, так и статической прочности соединений.

При циклическом и динамическом нагружении возможны относительные (достаточно малые) смещения деталей даже при их надёжной взаимной фиксации. Это может привести к коррозионно-механическому повреждению вала в зоне концентрации, что существенно снижает его долговечность.

Таким образом, повышение эксплуатационной безопасности соединений с натягом, особенно для механизмов самолётов и вертолётов, является практической необходимостью. В статье приведены сравнительные результаты испытаний статической и усталостной прочности образцов соединений с натягом, которые открывают некоторые перспективы решения данной проблемы при применении различных схем отделочно-упрочняющей обработки [4]. К ним относятся: гладкое алмазное выглаживание, нанесение регулярного рельефа в виде винтовой канавки, пластическая деформация поверхности косым ударом и вибровыглаживание.

Сравнительный анализ выносливости проводился для образцов соединений длиной $20^{+0,1}$ мм. Детали выполнялись из нормализованной стали 45. Диаметр вала дли-

ной $100^{+0,1}$ мм составлял 8 мм, а наружный диаметр втулки - 20 мм. Сборка соединений выполнялась селективно при исходном натяге $0,015_{-0,002}$ мм как механической запрессовкой, так и с нагревом втулки до 280 град. При сборке втулка устанавливалась на плите по торцу. Вал входил до упора на всю длину отверстия, что обеспечивало строго определённую длину его свободного конца.

Посадочную поверхность втулки получали растачиванием до $Rz < 6$ мкм, а вала - шлифованием до $Rz < 1,8$ мкм. Выглаживание проводилось натуральными алмазами с $R_{сф} = 2,5$ мм при усилии на индентор $P_y = 100$ Н, а нанесение микрорельефа - искусственными алмазами АСПК с $R_{сф} = 0,5$ мм при $P_y = 100$ Н. Для рельефа в виде винтовой канавки шаг профиля составлял $S_m = 0,3$ мм, при этом натяг соединения увеличивался до 20-25 мкм за счёт наплывов пластически деформированного металла.

Усталостные испытания образцов проводили на вибростенде ВЭДС-200 с частотой 250 Гц в условиях симметричного изгиба в одной плоскости. На стенде образец зажимался за втулку, а к свободному концу вала через муфту подвешивался груз. Статическая и динамическая тарировка проводилась на эталонном образце с помощью тензодатчиков и электронного осциллографа Н-115. Уровень напряжений в остальных образцах задавался по амплитуде колебаний, которая измерялась катетометром КМ-8.

Так как испытания носили сравнительный характер, то за их базу при определении предела выносливости σ_{-1} принимали $N = 10^7$ циклов нагружения [5]. Статистическая обработка результатов испытаний проводилась на основе корреляционного и линейного регрессионного анализа по методике работы [5] для малого числа экспериментов - $n = 20$. В табл. 1 приведены значения пределов выносливости σ_{-1} и эффективных коэффициентов концентрации напряжений K_σ в зависимости от вида обработки вала.

Таблица 1

Влияние вида отделочно-упрочняющей обработки вала на усталостную прочность соединений с натягом

Вид обработки поверхности вала	Сборка с нагревом втулки		Осевая запрессовка без смазки	
	σ_{-1} , МПа	K_{σ}	σ_{-1} , МПа	K_{σ}
Шлифование	140	1,930	115	2,348
Алмазное выглаживание	210	1,285	190	1,420
Рельеф в виде винтовой канавки	230	1,173	195	1,388
Гладкий вал без напрессовки	270	1,0	270	1,0

Анализ полученных данных показал, что независимо от типа сборки упрочняющая обработка позволяет существенно повысить выносливость валов в запрессовках за счёт влияния остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое, которые замедляют скорость развития в нём усталостных трещин [6]. Независимо от вида обработки валов усталостная прочность соединений при осевой запрессовке всегда ниже, чем при тепловой сборке, вследствие поверхностных дефектов, которые могут служить очагами зарождения усталостных трещин. Дисперсионный анализ влияния обработки вала (по 10 соединениям) на уровень ограниченной долговечности показал, что упрочнение даёт гораздо меньший разброс по сравнению со шлифованием. Это объясняется стабилизацией механических свойств в поверхностном слое металла и меньшим влиянием случайных технологических факторов. Общее же рассеивание IgN для соединений с натягом всегда выше, чем для гладких валов.

Микрорельеф контактных поверхностей работает как мягкое демпфирующее покрытие, что снижает концентрацию контактной нагрузки в соединении с натягом. Однако, с другой стороны, с ростом высоты неровностей вала увеличивается величина эффективного коэффициента концентрации напряжений. Для оценки влияния взаимно исключаящих факторов на усталостную прочность соединений без учёта упрочнения валов регулярный микрорельеф в виде винтовой канавки наносился на поверхность отверстия втулки. Результаты испытаний показали, что для тепловой сборки $\sigma_{-1} = 190$ МПа (против 140 МПа для шлифованных валов).

По данным работы [7], нанесение микрорельефа вибровыглаживанием, в виде сетки или винтовой канавки, существенно повышает стойкость поверхности

к коррозионно-механическим повреждениям за счёт локализации схватывания на вершинах неровностей. Поэтому эксплуатационная безопасность напряжённых соединений с такими видами отделочно-упрочняющей обработки поверхности вала при наличии относительно малых смещений деталей заметно выше при циклическом нагружении по сравнению с гладким выглаживанием.

Очевидно, что выпуклость одной из контактных поверхностей в соединении с натягом снижает концентрацию контактной нагрузки от посадки вплоть до нуля. Если подобная форма поверхности не превышает предельную величину, то сохраняется сплошность контакта. В противном случае отмечается раскрытие стыка от торцов втулки к центру соединения.

Для исследования влияния искусственной бочкообразности поверхности отверстия втулки на усталостную прочность соединений с натягом были испытаны две партии образцов при использовании разных схем её получения. В первом случае рельеф в виде винтовой канавки с шагом $S_m = 0,4$ мм наносился искусственным алмазом АСПК с $R_{сф} = 1$ мм с переменным усилием на индентор, которое изменялось от нуля у торцов втулки до $P_{y(max)} = 120$ Н в её середине. Во втором случае наносился такой же рельеф с постоянным усилием $P_y = 120$ Н; затем он подвергался гладкому выглаживанию натуральным алмазом с $R_{сф} = 3$ мм при продольной подаче $S_x = 0,05$ мм/об с переменным усилием, которое менялось от $P_{y(max)} = 150$ Н у торцов втулки до нуля в середине её отверстия. Для данных соединений максимальный натяг в центре контакта составлял 20-25 мкм, а на его границах - 14-17 мкм. Результаты усталостных испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние формы посадочной поверхности отверстия втулки на усталостную прочность соединений с натягом, собранных тепловой сборкой

Технология обработки поверхности отверстия во втулке	Вид поверхности	σ_{-1} , МПа	K_{σ}	Увеличение долговечности
Поверхность вала отшлифована, отверстие во втулке расточено	Цилиндрическая	140	1,930	1
Винтовой рельеф с постоянным усилием выглаживания	Цилиндрическая	190	1,420	1,36
Винтовой рельеф с постоянным усилием на индентор и гладкое выглаживание с переменным усилием	Выпуклая	210	1,285	1,50
Винтовой микрорельеф с переменным усилием выглаживания	Выпуклая	210	1,285	1,50

Анализ полученных данных показал, что при бочкообразности поверхности отверстия втулки удаётся существенно повысить усталостную прочность соединений с натягом. При этом технология получения отклонений формы не влияет на предел выносливости. Надо отметить, что при выпуклости отверстия разрушение валов происходило на расстоянии 3-7 мм от торцов втулки в глубине посадки. Постановка таких втулок на упрочнённый вал прироста σ_{-1} не даёт. Так, все три образца разрушились при напряжении цикла 220 МПа, не пройдя базу испытаний 10^7 циклов.

С целью исследования совместного влияния упрочнения валов и отклонений формы были испытаны две партии образцов напряжённых соединений с макси-

мальным натягом в центре контакта 20-25 мкм, а по границам сопряжения - 14-17 мкм. В одной партии на посадочные поверхности валов наносился винтовой микрорельеф с переменным усилием выглаживания $P_{y(max)} = 100$ Н ($R_{сф} = 0,5$ мм, $S_m = 0,3$ мм), что обеспечивало выпуклость его контактной поверхности с малой степенью упрочнения в месте излома. Во второй партии наносили аналогичный рельеф, но с постоянным усилием на индентор $P_y = 100$ Н. Затем полученный профиль подвергали гладкому выглаживанию натуральным алмазом с $R_{сф} = 3$ мм при переменном усилии $P_{y(max)} = 150$ Н. Такая технология обеспечивала выпуклость посадочной поверхности вала в сечении излома с высоким уровнем наклёпа. Результаты усталостных испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние искусственной выпуклости посадочной поверхности вала на усталостную прочность соединений с натягом, собранных тепловой сборкой

Технология обработки контактной поверхности вала	Вид контактной поверхности вала	σ_{-1} , МПа	K_{σ}	Увеличение выносливости
Винтовой рельеф с постоянным усилием выглаживания	Цилиндрическая	230	1,173	1,64
Рельеф с постоянным усилием и гладкое выглаживание с переменным усилием на индентор	Выпуклая	230	1,173	1,64
Винтовой рельеф с переменным усилием выглаживания	Выпуклая	225	1,200	1,61

Анализ полученных данных показал, что величина σ_{-1} составила соответственно 225 и 230 МПа, то есть по сравнению с соединениями без упрочнения, а только с выпуклостью отверстия втулки выносливость валов в запрессовках увеличилась всего на 7,2 и 9,5 %.

Таким образом, в проведённых исследованиях факторы упрочнения и пози-

тивных отклонений формы можно считать эквивалентными, так как сочетание упрочнения с рациональным законом распределения натяга незначительно повышает усталостную прочность соединений относительно сопряжений, в которых валы только выглажены ($\sigma_{-1} = 210$ МПа), или где имеются только отклонения формы поверхности отверстия втулки

($\sigma_1 = 210$ МПа). Данный вывод подтверждает и тот факт, что пределы выносливости вала с разным уровнем наклёпа и бочкообразной контактной поверхностью близки друг к другу (225 и 230 МПа).

Сравнительную оценку статической прочности при осевом нагружении проводили для образцов соединений с натягом диаметром 18 мм из стали 30ХГСА при длине втулки 24 мм. Наружную поверхность вала получали шлифованием с чистотой до $Rz < 1,8$ мкм, а поверхность втулки - растачиванием до $Rz < 6$ мкм. Величина исходного натяга, который подбирали селективно, составляла 0,020-0,002 мм. Результаты испытаний соединений при их сборке с нагревом втулки представлены в табл. 4.

Увеличение несущей способности напряжённых соединений при поперечной сборке определяется особенностями контактного взаимодействия посадочных поверхностей при сборке и распрессовке, а также увеличением натяга за счёт наплывов металла [8] при его локальной пластической деформации. По данным работы [9], при поперечной сборке происходит в большей степени взаимное внедрение не-

ровностей, нежели их пластическая деформация. Такой характер контактирования существенно повышает прочность посадки, так как при распрессовке соединения происходит взаимный срез и деформация выступов, находящихся друг между другом. Естественно, что благоприятное влияние на подобный процесс образования и нарушения фрикционных связей оказывает предварительное нанесение микрорельефа с регулярно сформированными и упрочнёнными неровностями. Так, для вибровыглаженных валов и валов с винтовым и сетчатым рельефом прочность соединений при осевом нагружении возросла соответственно в 1,77, 2,38 и 2,62 раза за счёт наплывов металла (табл. 4). Анализ несущей способности соединений с натягом при формировании модельного контакта показал, что их прочность резко возрастает при равенстве высотно-шаговых параметров микрогеометрии вала и втулки. Так, из данных табл. 4 следует, что при идентичном микрорельефе посадочных поверхностей деталей в виде винтовой канавки усилие распрессовки увеличилось в 3,19 раза.

Таблица 4

Влияние вида обработки контактной поверхности вала на статическую прочность напряжённых соединений (по 16 образцам) при сборке с нагревом втулки

Вид обработки вала	Rz , мкм	Усилие распрессовки, кН	Прирост прочности	Коэффициент трения
Точение	4,1	30,2	1,07	0,292
Шлифование	1,2	28,1	Эталон	0,271
Алмазное выглаживание	0,7	32,0	1,14	0,314
Вибровыглаживание	5,2	49,8	1,77	0,488
Винтовой микрорельеф	7,7	66,9	2,38	0,641
Сетчатый микрорельеф	7,9	73,6	2,62	0,712
Идентичный винтовой микрорельеф на деталях	6,9	89,5	3,19	0,892

Такой вид контакта приводит к идее создания конструкций по типу резьбовых или шлицевых. Поставленная цель достигается тем, что на валу и в отверстии втулки наносят полностью идентичный регулярный рельеф при равенстве его шаговых и высотных параметров. Для увеличения несущей способности соединения при осевом нагружении рельеф выполняют в виде последовательности кольцевых канавок или винтовой канавки, в том числе и многозаходной. При передаче крутящего момента наносят рельеф в виде ряда про-

дольных канавок, равномерно распределённых по окружности с заданным шагом.

Таким образом, при поперечной сборке регулярные рельефы являются эффективным средством снижения анизотропии коэффициента трения в осевом и окружном направлениях, а также усиления несущей способности соединений с натягом, работающих на сдвиг или кручение. Нанесение синхронных рельефов используют для предотвращения произвольной распрессовки соединений при эксплуатации в условиях циклического и динамиче-

ского нагружения. Однако существенным недостатком таких соединений является невозможность их переборок, то есть одноразовое использование.

Результаты испытаний статической прочности соединений с натягом при ме-

ханической запрессовке без смазки (числитель) и со смазкой (знаменатель) для различных видов отделочно-упрочняющей обработки вала представлены в табл. 5.

Таблица 5

Влияние вида обработки контактной поверхности вала на статическую прочность соединений с натягом (по 16 образцам) при их осевой запрессовке без смазки и со смазкой маслом АМГ-10

Вид обработки поверхности вала	$P(1)^*$, кН	$P(2)^*$, кН	$K = P(1)/P(2)$	$f(1)$	$f(2)$	Прирост прочности
Точение	9,8/ -	12,4/ -	1,27/ -	0,148/ -	0,188/ -	0,797/ -
Шлифование	12,8/11,9	15,6/14,1	1,22/1,19	0,139/0,129	0,169/0,152	Эталон 1,0
Алмазное выглаживание	13,8/10,2	17,7/13,8	1,34/1,35	0,188/0,117	0,253/0,157	1,140/0,978
Кольцевой микрорельеф	17,4/25,5	20,3/34,2	1,17/1,34	0,195/0,288	0,226/0,385	1,305/2,240
Сетчатый микрорельеф	19,1/ -	21,4/ -	1,12/ -	0,198/ -	0,221/ -	1,375/ -
Вибровыглаживание	16,2/13,2	24,1/18,4	1,48/1,39	0,154/0,119	0,230/0,185	1,555/1,305

* $P(1)$ - усилие запрессовки; $P(2)$ - усилие распрессовки.

Анализ полученных данных показал, что нанесение регулярных микрорельефов на валы также увеличивает несущую способность соединений при осевой запрессовке. Это объясняется не только увеличением натяга за счёт наплывов металла при пластической деформации поверхностного слоя, но и возрастанием фактической площади контакта вследствие пластического оттеснения материала вершин неровностей при сборке [10] и распрессовке. Регулярность расположения микровыступов способствует плавности запрессовки и обеспечивает стабильность коэффициента относительной прочности $K = P(2)/P(1)$, что имеет большое значение для ответственных узлов. При запрессовке с маслом наблюдается общее снижение коэффициента трения и прочности соединений независимо от вида обработки вала. Однако

для кольцевого рельефа отмечается резкое увеличение усилий распрессовки и запрессовки, что связано с эффектом гидрозатора масла в замкнутых масляных карманах при сборке соединений.

Изменение диаметров сопрягаемых деталей за счёт наплывов рельефа используется для восстановления величины натяга при исправлении брака. Нанесение регулярного рельефа на одну из поверхностей резко повышает сопротивление соединения к образованию надиров, что происходит за счёт упругопластического оттеснения, а не среза неровностей при его разборке и локализации очагов схватывания на отдельных выступах. Из данных табл. 6 следует, что для соединений с рельефом также отмечается наименьшее снижение прочности при переборках.

Таблица 6

Влияние вида обработки вала и типа сборки на снижение усилия распрессовки соединений с натягом при переборках ($i = 1, 2, 3$)

Вид обработки вала	$P(1)$, кН	$P(2)$, кН	$P(3)$, кН	$P(2)/P(1)$	$P(3)/P(2)$
Сборка с нагревом втулки до 280 град					
Точение	30,2	15,2	14,4	0,503	0,477
Шлифование	28,1	19,4	19,0	0,692	0,680
А/выглаживание	32,8	24,9	23,8	0,778	0,744
Вибровыглаживание	49,8	42,1	40,6	0,845	0,817
Винтовой рельеф	66,9	52,4	52,0	0,785	0,765
Сетчатый рельеф	73,6	66,1	64,8	0,895	0,880
Механическая запрессовка без смазки					
Точение	12,4	9,6	9,0	0,775	0,727
Шлифование	15,6	14,4	14,1	0,926	0,907
А/выглаживание	17,7	15,6	15,2	0,877	0,860
Вибровыглаживание	24,1	28,7	28,5	1,190	1,180
Винтовой рельеф	20,3	14,6	15,1	0,720	0,745
Кольцевой рельеф	22,5	15,9	16,8	0,707	0,747

Таким образом, внедрение прогрессивных технологий отделочно-упрочняющей обработки посадочных поверхностей деталей соединений с натягом позволяет заметно повысить их эксплуата-

ционные характеристики. К таким видам обработки относятся алмазное выглаживание, вибровыглаживание и нанесение различных видов регулярных микрорельефов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин / С.В. Бояршинов. - М.: Машиностроение, 1973. - 456 с.
2. Гречищев, Е.С. Соединения с натягом: расчёты, проектирование, изготовление / Е.С. Гречищев, А.А. Ильяшенко. - М.: Машиностроение, 1981. - 247 с.
3. Иосилевич, Г.Б. Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин / Г.Б. Иосилевич. - М.: Машиностроение, 1981. - 224 с.
4. Хворостухин, Л.А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, А.П. Ковалёв. - М.: Машиностроение, 1988. - 144 с.
5. Степнов, М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний / М.Н. Степнов. - М.: Машиностроение, 1972. - 232 с.

1. Boyarshinov, S.V. *Fundamentals of Machinery Structural Mechanics* / S.V. Boyarshinov. - M.: Mechanical Engineering, 1973. - pp. 456.
2. Grechishchev, E.S. *Joints with Tightness: Computations, Design, Manufacturing* / E.S. Grechishchev, A.A. Piyashenko. - M.: Mechanical Engineering, 1981. - pp. 247.
3. Iosilevich, G.B. *Concentration of Stresses and Deformations in Machinery* / G.B. Iosilevich. - M.: Mechanical Engineering, 1981. - pp. 224.
4. Khvorostukhin, L.A. *Increase of Machinery Bearing Capacity by Surface Strengthening* / L.A. Khvorostukhin, S.V. Shishkin, A.P. Kovalyov. - M.: Mechanical Engineering, 1988. - pp. 144.
5. Stepnov, M.N. *Mechanical Testing Results Statistical Processing* / M.N. Stepnov. - M.: Mechanical Engineering, 1972. - pp. 232.

6. Балацкий, Л.Т. Усталость валов в соединениях / Л.Т. Балацкий. - Киев: Техника, 1972. - 180 с.
7. Хворостухин, Л.А. К вопросу об экспериментальной оценке фреттингостойкости рабочих поверхностей соединений роликовых опор / Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин // Трение и износ. - 1983. - Т. 4. - № 5. - С. 915-924.
8. Шнейдер, Ю.Г. Прочность неподвижных соединений деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер, В.А. Забродин // Вестник машиностроения. - 1976. - № 6. - С. 42-44.
9. Бобровников, Г.А. Прочность посадок, осуществляемых с применением холода / Г.А. Бобровников. - 2-е изд. - М.: Машиностроение, 1971. - 96 с.
10. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 кн. / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алишина. - М.: Машиностроение, 1978. - Кн. 1. - 400 с.

6. Balatsky, L.T. *Shaft Fatigue in Joints* / L.T. Balatsky. - Kiev: Technique, 1972. - pp. 180.
7. Khvorostukhin, L.A. On problem of experimental assessment of working surface fretting-durability in joints of roller bearings / L.A. Khvorostukhin, S.V. Shishkin // *Friction and Wear*. - 1983. - Vol.4. - No.5. - pp. 915-924.
8. Shneider, Yu.G. Permanent connection strength of parts with regular micro-relief / Yu.G. Shneider, V.A. Zabrodin // *Bulletin of Mechanical Engineering*. - 1976. - No.6 - pp. 42-44.
9. Bobrovnikov, G.A. *Strength of Fits Carried Out Using Cold* / G.A. Bobrovnikov. - 2-d Ed. - M.: Mechanical Engineering, 1971. - pp. 96.
10. *Friction, Wear and Lubrication: Reference Book: in 2 Books* / under the editorship of I.V. Kragelsky, V.V. Alisin. - M.: Mechanical Engineering, 1978. - Book 1. - pp. 400.

Статья поступила в редакцию 25.03.19

Рецензент: д.т.н., профессор директор дирекции института № 9
Московского авиационного института
Рабинский Л.Н.

Статья принята к публикации 27. 05. 19.

Сведения об авторах:

Шишкин Сергей Виленович, д.т.н., профессор кафедры «Детали машин» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), тел. 8-915-371-76-01, e-mail: sshisha@yandex.ru.

Shishkin Sergey Vilenovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Machinery", Moscow Aircraft Institute (National Research University), e-mail: sshisha@yandex.ru.