

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ  
ЖУРНАЛ

# СБОРКА

## В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ



ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ  
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.01 — Теоретическая механика, 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела, 01.02.06 — Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, 05.02.02 — Машиноведение системы приводов и детали машин, 05.02.04 — Трение и износ в машинах, 05.02.05 — Роботы, мехатроника и робототехнические системы, 05.02.07 — Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии, 05.02.11 — Методы контроля и диагностика в машиностроении, 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы, 05.02.18 — Теория механизмов и машин, 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности

2019      Том 20  
                9 (230)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### *Сборочное оборудование и его элементы*

Березин С.Я. Технологические особенности автоматизированной сборки соединений на основе микровинтов ..... 387

#### *Современные технологии сборки*

Микаева С.А., Резник А.А. Сборка радиочастотной метки для работы на металлической поверхности на основе специальной микросхемы ..... 393

#### *Обеспечение качества. Испытания. Контроль*

Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А., Гончарова Д.А., Филиппов А.А., Нуждина Т.В. Оценка факторов влияния коррозионной среды на усталость автомобильных материалов ..... 396

#### *Соединение деталей машин*

Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Условия автоматизированного согласования взаимного положения сборочных компонент ..... 402

#### *Трение и смазка в машинах и механизмах*

Панин С.В., Корниенко Л.А., Хуан Цитао, Буслович Д.Г., Алексенко В.О. Механические и триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ со стекловолокном, функционализированным силансодержащими модификаторами (часть 2) ..... 407

Меделяев И.А. Волновой характер деформации при трении скольжения ..... 415

Мигранов М.Ш., Мигранов А.М. Геометрическая адаптация режущего клина для повышения износостойкости инструмента ..... 423

#### *В помощь конструктору, технологу*

Розинов А.Я., Логунов В.В. Диагностика возможности сокращения непроизводительных трудозатрат и механизации процесса сборки соединений наружной обшивки, подкрепленной ребрами жесткости ..... 427

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — 84967) или непосредственно в издательстве

Tel.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

E-mail: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель редакционного совета  
В.И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН

#### Редакционный совет

##### МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф.  
В.В. БАРДУШИН, д.ф.-м.н.  
И.А. БУЯНОВСКИЙ, д.т.н., проф.  
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.  
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.  
С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н.  
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.

Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.  
А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц.  
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.  
А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.  
И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.  
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН  
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.  
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

#### Региональные редсоветы

##### РЫБИНСК

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.  
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.  
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

##### ВОЛГОГРАД

М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.  
В.И. ЛЫСАК, акад. РАН  
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

##### ИЖЕВСК

И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.  
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.  
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

##### КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

##### КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

##### КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.  
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

##### НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

##### ОРЕЛ

Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.  
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

##### ОРЕНBURГ

А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.  
А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.  
А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

##### ПЕРМЬ

С.М. БЕЛОБОРОДОВ, д.т.н.  
В.Ф. МАКАРОВ, д.т.н.

##### РОСТОВ-НА-ДОНЕ

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.  
И.В. КОЛЕСНИКОВ, д.т.н., проф.

##### Беларусь

##### МИНСК

В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.  
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

##### ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

##### Украина

##### КИЕВ

А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.  
В.А. МАТВIЕНКО, к.т.н.

##### ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

##### Польша

П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.  
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

#### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в РОСКОМНАДЗОРе.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953  
от 09.12.2015 г.



# СБОРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЕГО ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.757

**С.Я. Березин, д-р техн. наук**  
(Забайкальский государственный университет, г. Чита)  
E-mail: Berlog\_berezin2011@mail.ru

## Технологические особенности автоматизированной сборки соединений на основе микровинтов

Рассмотрены особенности выполнения автоматизированных операций завинчивания винтов с диаметром резьбы менее 1 мм (микровинтов) в резьбовые отверстия. Приведены виды технологического оборудования, включая завинчивающие головки, вибробункеры и питатели, манипуляторы перемещения головок. Представлены примеры соединений с микровинтами и расчетные формулы для определения геометрических, силовых и скоростных параметров сборки.

The peculiarities of implementation of automated operations of screwing a separate class of screws with a thread diameter of less than one millimeter (micro-screws) in the threaded holes are considered. The types of technological equipment, including screwed heads, vibrating hoppers with feeders, manipulators of heads movement are given. Examples of the most well-known types of joints with micro-screws and calculation formulas for determining the geometric, power and speed parameters of the assembly are presented.

**Ключевые слова:** резьбовое соединение, микровинт, сборка, манипулятор, завинчивающая головка, вакуум, питатель, вибробункер, привод электрический, двигатель шестеренно-вакуумный, ориентатор, муфта, момент затяжки, сила затяжки, шлицевый паз.

**Keywords:** threaded joints, micro-screws, assembly, manipulator, screwed head, vacuum, feeder, hopper, electric drive, engine gear and the vacuum, orientator, clutch, torque, force tightening, spline groove.

Термин "микровинт" (micro-screws) относится к винтам с резьбой диаметром менее 1 мм. Однако в этой группе существует несколько неопределенностей:

— шаг резьбы варьируется в широких пределах (выпускают микровинты с метрической резьбой по ГОСТ 24705—2004 и с шагом, соответствующим самонарезающим винтам, и со специальными шагами);

— отсутствие четко регламентированного диапазона диаметров резьбовой части;

— различные конструкции головок, концевых частей, приводных элементов, требований к качеству и т.д.

В общем, какие изделия можно четко отнести к разряду микровинтов, в настоящее время пока не установлено.

Тем не менее область их применения достаточно широка: производство различных приборов точной механики — часы, секун-

домеры, курвиметры, высотомеры, контрольно-измерительные приборы, измерительные преобразователи, оптические приборы, очки, электронная промышленность, сборка узлов печатных плат и др.

Для часовного производства выпускают винты диаметром 0,4...1,6 мм (рис. 1).

Винты с диаметром резьбы менее 1 мм относят к разряду микродеталей, и информации по сборке соединений с такими изделиями очень мало [5]. Подобную продукцию выпускают различные компании, среди которых выделяются Китай и Тайвань. Диапазон размеров тоже четко не установлен. Например, американская компания US Microscrew производит винты с диаметром от 0,6 мм. Компания JCIS Micro Screw (Япония) — 0,6...2,5 мм. Китайская Doigying Youjia Inc. — 0,4...1,4 мм, Тайваньская Lih Ta Fasteners от 0,6 мм. По ГОСТ 24705—2004 регламентируются диаметры резьб, начиная



Рис. 1. Винты для сборки механических часов M0,5×1,4 (1) и винты с резьбой M2,0 (2)

от 0,1 мм. При монтаже и автоматизации сборки микровинтов возникают проблемы, связанные с малыми размерами и массой, качеством изготовления, физическими свойствами и др.

Устанавливают микровинты вручную или на автоматических сборочных модулях с одной или несколькими позициями в зависимости от степени концентрации операций на единицу оборудования. Каждая позиция включает манипулятор с завинчивающей головкой и загрузочно-подающее устройство. При многопозиционной сборке модуль снабжается транспортным устройством для перемещения собираемого узла.

Можно выделить две группы сборочного оборудования, разделенные по размерам резьбы способом подачи винтов в завинчивающую головку: а) по трубчатым питателям (M2...M4); б) по лотковым питателям (M5, M6). Захват крепежных деталей проводится на основе так называемого "вакуумного подсоса" [3]. Оборудование для сборки пар с микровинтами на основе завинчивающих головок, снабженных вакуумным захватом

деталей из питателей, может составить третью группу сборочного оборудования. Вакуумные захваты обеспечивают хорошее управление ориентацией и работу с различными материалами и поэтому обычно предпочтительны для автоматизированной отвертки. Этот метод требует аксессуаров, таких как вакуумный насос, клапаны, трубы и вакуумные адаптеры [5].

Завинчивающие головки третьей группы несут приводы вращательного движения отвертки, устройства для захвата головки винта из питателя и его удержания при переносе от питателя к точке завинчивания. Манипуляторы для переноса имеют 2-координатную систему позиционирования. Отвертка приводится во вращение электрическим или пневматическим (вакуумным) приводом. Завинчивают микровинты по "жесткому" режиму, когда затяжка головки идет в упор, без компенсирующих шайб или прокладок. Поэтому требуются меры для устранения ударов и пиковых вращательных нагрузок. В настоящее время предпочтение отдают пневматическим приводам

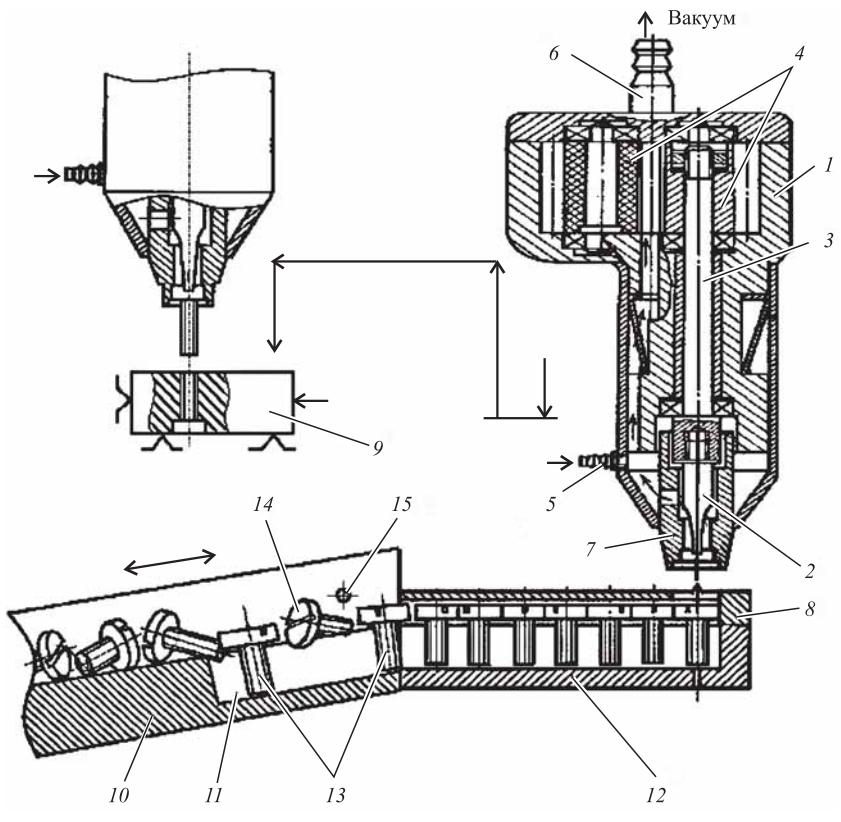


Рис. 2. Сборочный агрегат для автоматического завинчивания микровинтов в деталь



отверток, а именно вакуумно-шестеренным двигателям (рис. 2).

Завинчивающая головка имеет корпус 1, в котором размещается отвертка 2 с приводом 3 в виде двух находящихся в зацеплении косозубых шестерен 4, через которые разряженный воздух протекает из патрубка 5 в штуцер 6.

Для захвата головки винта наконечником 7 патрубок 5 перекрывается пневмоклапаном и воздух перенаправляется к центральному отверстию наконечника. Головка винта притягивается к седлу наконечника и вытягивается из питателя 8. Далее он вместе с головкой передносится манипулятором на позицию завинчивания и устанавливается в отверстие детали 9.

Загрузочно-подающее устройство включает в себя вибробункер 10 с улиткой, в конце которой имеется ориентатор 11, выполненный в виде продольного паза под резьбовой стержень винта. К правому торцу ориентатора пристыкован питатель 8 с таким же продольным пазом 12. Если винт имеет положение 13, т.е. правильно сориентирован, он проваливается стержнем в паз и двигается дальше из ориентатора 11 в паз 12 питателя 8. Если винт не попадает стержнем в паз ориентатора, а идет с перекосом (позиция 14), по нижней кромке головки, то он отбрасывается потоком воздуха из отверстия 15 в чашу вибробункера.

В работах [3, 4] приведено описание двух видов завинчивающих головок с электроприводами отверток: с трубчатыми питателями; с вакуумным захватом винтов из накопителей и питателей. В случае электрического привода отверток желательно применять муфты, обеспечивающие "мягкий" режим завинчивания. Для этого рекомендованы фрикционные, магнитные, электромагнитные и пружинные муфты.

Номинальный момент затяжки винтов зависит от вида соединения (конструкции) и ряда факторов, к которым относятся прочностные характеристики материала винта, коэффициенты трения в резьбе и на опорной поверхности головки винта, качество и геометрия резьбы. В упрощенном виде крутящий момент затяжки:

$$M_{kp} = 0,001Q(0,16P + \mu_p d + T_r), \quad (1)$$

где  $Q$  — сила предварительной затяжки;

$P$  — шаг резьбы, мм;

$\mu_p$  — коэффициент трения в резьбе;

$d$  — наружный диаметр резьбы;

$T_r$  — параметр, связанный с процессом трения по опорной поверхности головки винта.

Значение крутящего момента затяжки необходимо знать для настройки муфт, передающих вращательное движение на отвертку или для расчета давления разряжения воздуха вакуумно-шестеренного привода.

Силу предварительной затяжки винта определим по формуле [2]:

$$Q = 0,6\sigma_t \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2)$$

где  $\sigma_t$  — предел текучести материала винта, МПа.

Параметр  $T_r$  из формулы (1) зависит от геометрии соединения и его типа (таблица). На первой позиции приведен эскиз установки на оси с посадочным диаметром  $d_{oc}$  вращающейся детали, например часовой шестерни. Вращение обеспечивается наличием зазора  $\delta$  под головкой винта. Второй эскиз представляет крепление неподвижной пластины с ее центрированием по диаметру бобышки  $d_b$ . На третьей позиции показан способ фиксации головкой винта опорного камня для оси вращающейся детали. Четвертый эскиз представляет закрепление винтом упругих пластин, плоских пружин, прижимов и т.д. Пятая позиция показывает завинчивание длинного винта в нижнее резьбовое отверстие и в по-тайное гнездо под головку. Шестой эскиз представляет упругий винтовой зажим для создания фрикционного момента  $M_t$  на опорном регулировочном винте, удерживающем игольчатую ось качающейся или вращающейся детали — маятника, коромысла и пр. Момент создается затяжкой с определенной силой  $Q$  двух винтов.

Значительное внимание при сборке уделяют физическим и качественным показателям винтов. Принимают меры для устранения остаточной намагниченности материала винтов. Ввиду малости поперечных размеров класс прочности материала не должен быть ниже 5.6, 5.8, и, соответственно, предел текучести — 300...400 МПа.

Высокое качество поверхностного слоя резьбы и головок обеспечивают исходя как из технологических требований, так и с эстетических позиций. Например, головки часовых винтов подвергают полировке для декоративных целей и для более надежного сопряжения с жалом отвертки (рис. 3).

**Примеры соединений с микровинтами**

Тип соединения	Расчетные формулы
1. Крепление вращающейся детали	$T_r = \mu_t R_t = 0,25\mu_t(d_{oc} + d),$ <p>где <math>\mu_t</math> — коэффициент трения на опорной поверхности головки;  <math>R_t</math> — радиус трения;  <math>d, d_{oc}</math> — диаметры резьбы и оси соответственно</p>
2. Закрепление и центрирование пластин	$T_r = \mu_t R_t = 0,25\mu_t(d_r + d_b),$ <p>где <math>d_r, d_b</math> — диаметры головки винта и бобышки соответственно</p>
3. Фиксация опорного камня (винт прижимает опорный камень)	$T_r = \mu_t R_t = 0,212\mu_t(d_r + d) + 0,04\mu_k(d_r - \Delta/2),$ <p>где <math>\mu_k</math> — коэффициент трения по камню;  <math>\Delta</math> — сближение осей</p>
4. Крепление упругой пластины	$T_r = \mu_t R_t = 0,25\mu_t(d_r + d_o),$ <p>где <math>d_o</math> — диаметр отверстия в пластине</p>



Окончание таблицы

Тип соединения	Расчетные формулы
5. Установка винта с потайной головкой	$T_t = \mu_t R_t = 0,25\mu_t(d_t + d_o),$ <p>где <math>L_3</math> — длина участка затяжки</p>
6. Упругий зажим регулировочного винта игольчатой оси	<p>Момент затяжки рассчитывают по формуле (1), а сила <math>Q</math> равна:</p> $Q = \frac{16}{22} \frac{M_t}{\mu_p d},$ <p>где <math>M_t</math> — необходимый момент трения на опорном винте оси</p>

Для определения скорости вращения отвертки при завинчивании винтов рассмотрим схему начального этапа совмещения лезвия отвертки со шлицевым пазом головки (рис. 4). Лезвие входит в паз с зазором  $\Delta$  и вращается со скоростью  $v$ . Диаметр головки  $D_g$ , длина лезвия равноцenna диаметру головки, глубина паза  $h$ , масса винта  $m$ . В начальный момент лезвие не

совмешено с пазом, и винт прижат к отвертке разряженным воздухом с давлением  $p$ . После включения вращения отвертки паз совмещается с лезвием, головка винта под действием вакуума поднимается вверх, захватывается отверткой и начинается завинчивание.

Для определения скорости вращения отвертки необходимо соблюдение следующего



Рис. 3. Вид полированной головки винта с резьбой M0,6×38

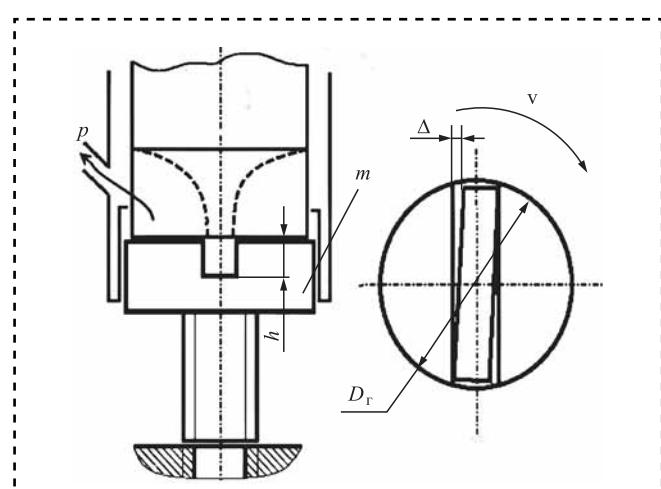


Рис. 4. Схема совмещения лезвия отвертки с пазом винта



условия: время попадания отвертки в паз должно быть не меньше времени поворота лезвия на угол, соответствующий зазору  $\Delta$ .

Определим время попадания лезвия в паз. Установим, что потенциальная энергия прижатия головки к лезвию отвертки разряженным воздухом равна:

$$P = KpFh, \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент потерь давления на зазоры по боковой стороне головки винта,  $K = 0,58...0,7$ ;

$p$  — давление разряжения;

$F$  — площадь головки винта;

$h$  — глубина паза.

Пренебрегая массой винта, определим кинетическую энергию движения головки винта при попадании отвертки в паз

$$K = \frac{mh^2}{2t_1^2}, \quad (4)$$

где  $t_1$  — время совмещения паза с отверткой.

Приравняв кинетическую энергию с потенциальной по формулам (3) и (4), после преобразований относительно времени, получим

$$t_1 = \sqrt{\frac{mh}{2KFp}}. \quad (5)$$

Время перемещения лезвия на  $\Delta$  в пазу:

$$t_2 = \Delta/v. \quad (6)$$

Приравняв оба времени после преобразований относительно скорости, получим

$$v = \frac{\Delta}{\sqrt{\frac{mh}{2KFp}}}. \quad (7)$$

При значениях:  $p = -0,14$  МПа;  $h = 0,4$  мм;  $\Delta = 0,02$  мм;  $K = 0,65$ ;  $m = 2,5$  мг;  $D_g = 1$  мм расчетная скорость будет соответствовать частоте вращения

$$n = \frac{60v}{\pi D_g} = 166...180 \text{ мин}^{-1}. \quad (8)$$

Данные расчетов дают информацию для проведения работ по настройке и регулировке оборудования. В период пусконаладочных работ пробные операции сборки, проводимые при различных режимах скоростей позиционирования манипулятора, вращения отверт-

ки, глубины (уровня) вакуума, позволяют установить их оптимальные значения. Регулируются крайние положения оси завинчивающей головки относительно точек захвата винта и точек завинчивания в деталь. От точности относительного положения элементов в системе головка—винт—деталь—отверстие зависят предельные значения погрешностей относительного ориентирования осей винта и отверстия.

Установление этих погрешностей требует дополнительных исследований и в данной статье этот вопрос не рассмотрен. В работе [1] анализируется точность относительного положения осей с точки зрения возникновения бракоопасных ситуаций при сборке.

В настроочный период контролируются также качество заточки лезвия отвертки и надежность совмещения с пазом головки винта в точке завинчивания. Регулировкой уровня вакуума и расхода воздушного потока в магистрали привода отвертки добиваются получения необходимых моментов затяжки соединения.

В головках с электроприводами такие же действия проводят с муфтами передачи крутящих моментов на отвертку.

Надежность и качество резьбозавинчивающего оборудования для установки микровинтов в значительной мере определяются следующими особенностями: конструктивные элементы сборочных агрегатов для подобных операций, свойства самих микровинтов и сопрягаемых деталей, наличие расчетной базы для установления необходимых параметров сборки, качество проведения регулировочных и пусконаладочных работ.

## Библиографический список

1. Березин С.Я., Чумаков Р.Е. Оптимальное управление скоростью завинчивания при монтаже резьбообразующих винтов // Автоматизация и современные технологии. 2004. № 2. С. 17–23.
2. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
3. Парнес М.Г. Механизация и автоматизация сборки и монтажа радиоаппаратуры. М.: Энергия, 1975. 328 с.
4. A survey of Automatid Threaded Fastening / Zh. Jia et al. // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2018. P. 1–13.
5. Yi Qin. Micro-Manufacturing Engineering and Technology // Micro & Nano Technologies Series. Amsterdam — Oxford: Publishing company Elsevier, 2010. 405 p.

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ

УДК 621.3.049.779

**С.А. Микаева, д-р техн. наук, А.А. Резник**  
(МИРЭА — Российский технологический университет)  
E-mail: mikaeva@npo.lit.ru

## Сборка радиочастотной метки для работы на металлической поверхности на основе специальной микросхемы

*Рассмотрены принцип работы радиочастотных меток (RFID), особенности конструкции, сборки и считываания UHF RFID-меток для металлических объектов и возможные варианты усовершенствования RFID-микросхемы, предназначенной для работы на металле.*

*This article discusses the collected radio frequency label for operation on the basis of a special chip and the problem associated with the operation of radio frequency labels UHF range in close contact with different media. The principle of operation of RFID systems is explained, design features, Assembly and reading of UHF RFID tags for metal objects are considered. Considered one of the possible options for improving RFID chip designed to work on metal.*

**Ключевые слова:** сборка, радиочастотная метка, металл, микросхема, конструкция, проблема, диапазон.

**Keywords:** assembly, radio frequency tags, metal, chip, design, problem, range.

Широкое применение для маркировки и идентификации имеют средства радиочастотной бесконтактной идентификации (RFID — radio frequency identification). К идентификаторам относят: бесконтактные пластиковые и бумажные карты, тонкие 2D-метки-самоклейки, 3D-метки, изготовленные в корпусном (пластиковом) варианте. В подавляющем большинстве применяют пассивные RFID-метки, не содержащие в себе какого-либо источника питания, для запитки микросхемы и ответов в окружающее пространство электромагнитной энергии от электромагнитного поля, создаваемого считывателем (рис. 1 на стр. 2 обложки).

Основу любого из перечисленных конструктивов составляет транспондер, т.е. микросборка антенны и смонтированной на ней микросхемы радиочастотной идентификации.

При практическом применении радиочастотных меток в UHF-диапазоне (850...990 МГц) в зависимости от свойств окружающей метку среды и дальности удаления метки от того или иного диэлектрического, металлического или электролитического объекта, размеров объекта, дальность считывания и резонансная частота конструкции метка—объект может варьироваться в определенном диапазоне значений.

Например, идеально настроенная в резонанс в открытом пространстве и с большой дальностью считывания плоская UHF радиочастотная метка, при применении на реальных материалах из-за сдвига частоты (при контакте с материалом) может вообще не считываться на несущей частоте считывателя — 867 МГц.

Наклеенная на металлический предмет плоская 2D UHF-метка практически не считывается [1—4].

Исследования были выполнены на специализированном оборудовании VOYANTIC, предназначенном для RFID-измерений в осях дальность считывания—частота (рис. 2). Графики аналогичны графикам, выполняемым в осях амплитуда—частота (АЧХ).

Отечественная микросхема для RFID — сложное изделие, состоящее из нескольких десятков и даже сотен миллионов дискретных элементов (рис. 3 на стр. 2 обложки). Микросхема выполнена на комплементарных МОП-транзисторах (логика на полевых транзисторах) по технологии с проектными нормами 180 нм.

Радиочастотная идентификация — это технология бесконтактного обмена данными, в основе которой лежит применение радиочастотного электромагнитного излучения. Работа RFID-

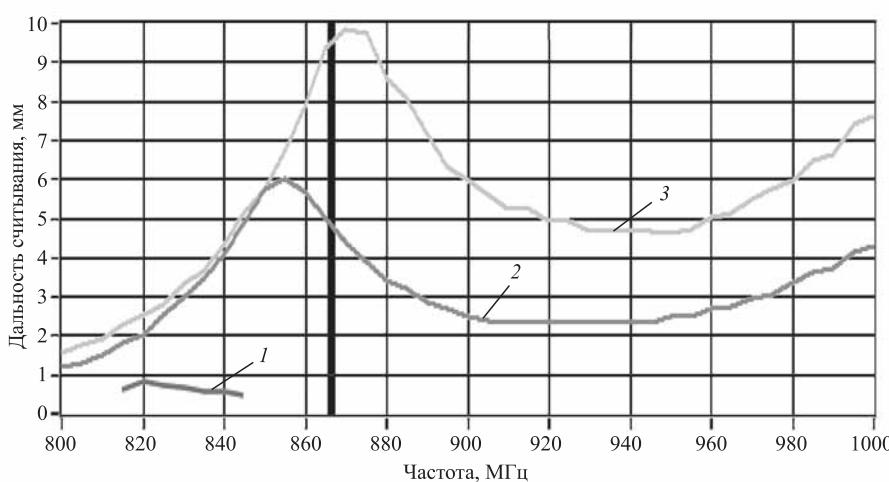


Рис. 2. АЧХ метки, находящейся вплотную на металле (1) и на расстоянии 1 см (2) и 2 см (3) от металла

технологии основана на применении считывателя и метки. Считыватель представляет собой источник электромагнитной волны определенной частоты, модулированной прямоугольными импульсами команд, идущими от считывателя к метке. Метка состоит из антенны и чипа, который в состоянии реагировать на команды считывателя. Рассматриваемая метка относится к пассивным меткам, так как не содержит в своем составе источника электрической энергии. Метка для работы использует энергию, полученную из энергии внешнего электромагнитного поля, в данном случае — поля считывателя.

Принцип работы RFID-метки представлен на рис. 4 [5]. Пример метки для работы на металле с диэлектрическими вкладками из поликарбоната и радиокерамики представлен на рис. 5 на стр. 2 обложки.

Отклонение от резонансной частоты 867 МГц (обозначено серым вертикальным маркером) хотя бы на 15 МГц в любую сторону приводит к уменьшению считывания

UCODE 8 с соответствующими изменениями (функция автоподстройки входного сопротивления), в результате расширился рабочий диапазон частот "наметальных" меток. Полка неизмен-

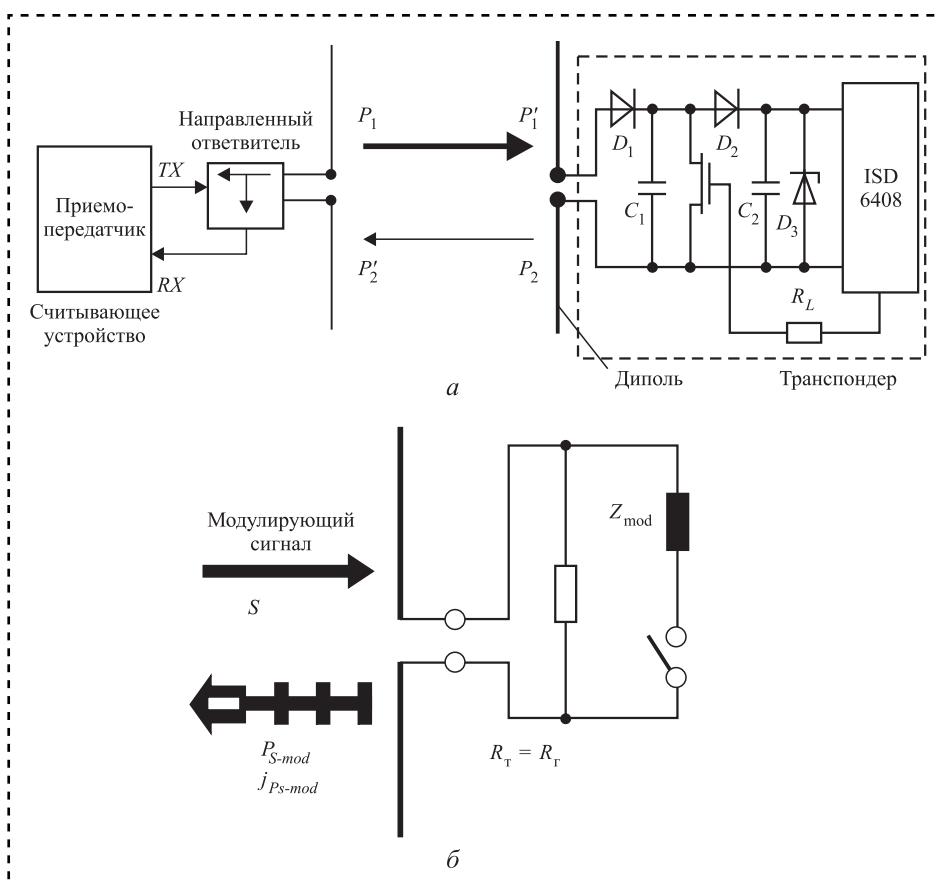


Рис. 4. Принцип действия отражательной UHF-метки (а) и схема модуляции отраженного сигнала меткой (б)

в два и более раз (рис. 6 на стр. 3 обложки).

Если в микросхему для "наметальных" меток внести изменения в ее входной импеданс, это позволит уменьшить добротность контура антenna—микросхема и немного расширить полосу пропускания.

Необходимо создание специальных микросхем, предназначенных только для меток, работающих на металле и по своим конструктивным свойствам отличающихся от микросхем, предназначенных для плоских меток.

За рубежом эта проблема решена для микросхемы



ной дальности считывания на уровне 25 м стала шире (рис. 7 на стр. 3 обложки).

Отечественную UHF-микросхему, предназначенную для работы на металлах, также необходимо доработать. Поэтому в настоящей работе сделана попытка провести эксперимент в целях расширения полосы пропускания метки за счет приемлемого уменьшения добротности входного контура UHF-метки. Это обеспечит гарантировано стабильную дальность считывания в полосе  $F = F_{\text{рез}} \pm 15$  МГц.

В качестве первого шага предложено добавить в состав входного сопротивления микросхемы шунтирующее сопротивление определенного номинала. Эта модернизация позволит расширить полосу пропускания метки.

В качестве объекта исследования взята стандартная отечественная UHF-микросхема для плоских меток, на базе которой изготовлена тонкая "наметалльная" метка толщиной 2 мм (рис. 8), не обладающая значительной дальностью, которой обычно обладают объемные метки толщиной от 5 до 10 мм [6, 7]. Для этой метки получена АЧХ с параметрами:  $F_{\text{рез}} = 920$  МГц и дальность считывания метки  $R = 5$  м (рис. 9, а на стр. 3 обложки).

Входной импеданс  $Z$  примененной микросхемы на частоте 915 МГц имел комплексное значение  $12,5-j277$ . В исходной метке импедансы микросхемы и антенны комплексно сопряжены. В этой метке вход микросхемы несколько раз шунтировали параллельными сопротивлениями 5, 10, 22, 33 кОм (рис. 9, б).

Оптимальное шунтирующее сопротивление для данного типа микросхемы — 33 кОм, применив которое дальность считывания уменьшилась с 5,5 до 3,5 м (в 1,57 раза), зато полоса пропускания увеличилась почти в два раза:



Рис. 8. Метка для металла на базе отечественной микросхемы

с 10 до 19 МГц. Сдвиг резонансной частоты метки влево может быть восстановлен на уровне 920 МГц за счет незначительного уменьшения длины верхних излучателей антенны метки.

## Заключение

Для радиочастотной маркировки металлических объектов плоские традиционные RFID-метки использовать не могут, так как при плотном контакте с металлами они не могут быть считаны.

Для радиочастотной маркировки металлических объектов должны применяться объемные радиочастотные метки специальной конструкции (3D-метки). Эти метки при работе на металлических предметах показывают значительную дальность считывания и демонстрируют высокодобротную АЧХ в осях частота—дальность считывания, что для условий их применения и производства скорее недостаток, чем преимущество.

Добротность 3D-меток для работы на металлических предметах может быть снижена путем введения в конструкцию микросхемы специально подобранных (расчитанных) шунтирующих резисторов.

Входной импеданс микросхем используемых в 3D-метках для работы на металле рассчитывают исходя из требований полосы пропускания не менее 20 МГц.

Микросхемы для плоских RFID-меток не рекомендованы к применению в метках для работы на металлических предметах.

## Библиографический список

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. М.: Издательский центр "Академия", 2006. 560 с.
2. Отчет по ОКР "ММД" ПАО "Микрон". М.: АО "НИИМЭ", 2017. 81 с.
3. Машкова Т.Т., Степанов С.В. Основы радиотехники: учеб. для техникумов. М.: Радио и связь, 1992. 232 с.
4. Ларионов М.Ю. Теоретическое обоснование причин изменения параметров считывания радиочастотных меток UHF диапазона при их контакте с плотными внешними средами // Труды 60-й Всерос. науч. конф. МФТИ. 2017. С. 284–285.
5. Финкенцеллер Клаус. Справочник по RFID / пер. с нем. Н.М. Сойунханова. М.: Додэка-XXI, 2008. 488 с.
6. Микаева С.А. Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: РУСАЙНС, 2018. 135 с.
7. Микаева С.А., Брысин А.Н. Электротехника. Казань: Бук, 2018. 228 с.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ

УДК 620.1+669

Г.В. Пачурин, Н.А. Кузьмин, д-ра техн. наук, Д.А. Гончарова, А.А. Филиппов, канд. техн. наук,  
Т.В. Нуждина, канд. техн. наук  
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)  
E-mail: pachurinGV@mail.ru

## Оценка факторов влияния коррозионной среды на усталость автомобильных материалов

Рассмотрено влияние коррозионной среды на закономерности сопротивления усталости автомобильных конструкционных сталей. Выявлены факторы, влияющие на сопротивление усталостному разрушению: среда и ее агрессивность; частота, форма цикла и асимметрия цикла нагружения. Использование кривых текущего прогиба при циклическом нагружении образцов позволяет зафиксировать момент зарождения трещины и определить скорость ее последующего распространения для обоснования выбора материалов, повышения ресурса, снижения материалоемкости машин и технологии изготовления с учетом условий их эксплуатации и улучшения ремонтопригодности автомобилей.

*The influence of the corrosive environment on the laws of fatigue resistance of automotive structural steels is considered. The factors affecting the resistance to fatigue failure are identified: the environment and its aggressiveness; frequency, shape of the cycle and asymmetry of the loading cycle. Using the curves of the current deflection under cyclic loading fixing the moment of crack initiation and determining the speed of its subsequent propagation to justify the choice of materials, increase resource, reduce the consumption of materials for machines and manufacturing technology, taking into account the conditions of their operation and to improve maintainability of the cars.*

**Ключевые слова:** конструкционные материалы, коррозионная среда, усталостные трещины, кривые прогиба, циклическая долговечность.

**Keywords:** construction materials, corrosive environment, fatigue cracks, deflection curves, cyclic durability.

В процессе эксплуатации детали и узлы автомобиля подвергаются различным видам нагрузок, приводящим к деструкции материалов его конструкции. Наиболее опасны — вибрационные нагрузки в присутствии коррозионной среды, которые приводят к возрастанию вероятности возникновения аварийных ситуаций [1, 2].

Эксплуатационные показатели конструкционных материалов формируются на всех стадиях металлургического передела [3]: от выбора шихтовых материалов для выплавки металла до получения готовых деталей [4, 5]. Одна из причин увеличения ресурса и эксплуатационной надежности — высокая стоимость конструкционных материалов автомобиля. Поэтому проведение экспериментальных исследований усталостных характеристик

конструкционных материалов в целях подбора конкурентного материала, снижения металлоемкости изделий, назначения новых методов обработки — приоритетное направление в современном автомобилестроении [6].

Решение этой задачи предполагает изучение процесса усталостного разрушения металлов и сплавов в условиях присутствия коррозионной среды с возможностью определения длительности периода до зарождения трещин и интенсивности их дальнейшего продвижения по сечению конструкции. Это позволит выбрать материал, соответствующий требованиям эксплуатации, и, как следствие, предотвратить его разрушение, обеспечить снижение финансовых и временных затрат на ремонт автомобиля.

Детали автомобиля изготавливают по разным технологиям, а изучение деструкции



материалов при усталости осложняется длительностью и условиями испытаний [7—9]. Поэтому задача обеспечения работоспособности деталей и конструктивных элементов автомобилей с учетом воздействия коррозионной среды — одна из актуальных в машиностроении. При этом кроме разработки технологии изготовления детали важно учесть все факторы, которые оказывают влияние на ее эксплуатационную долговечность.

Усталостные процессы в материалах при наличии коррозионной среды, как правило, значительно ускоряются [10—12], что приводит к непрерывному снижению многоцикловых кривых усталости, не достигающих предела выносливости.

Отнулевой чистый изгиб (частота нагружения 167; 16,7 и 1,67 Гц) гладких образцов из стали 15ХН5ДМФ показал [13], что морская вода незначительно влияет на время до возникновения трещины, но сокращает стадию ее развития. При этом сопоставление кинетики роста коротких и длинных трещин на стальях A537CL 1 [14] и JIS SNCM439 [15] выявило существенное (примерно в 10 раз) ускорение роста коротких трещин по сравнению с длинными. Короткие трещины распространяются по границе между зернами, а длинные — через зерно.

Значительно снижается долговечность сталей и сплавов при уменьшении частоты нагружения для:

15ХН5ДМФ [13] — при частотах от 167 до 1,67 Гц;

422, SVS410 [16] — в диапазоне от 10 до 0,1 Гц;

низколегированной Cr—Mo-стали [17] — при частотах от 30 до 0,03 Гц;

высокопрочных AISI 4340, 12Ni—5Cr—3Mo, 10Ni—Cr—Mo—Co и мартенситно-стареющей стали с 18 % Ni [18], 200 [12] — в интервале от 3,3 до 0,017 Гц;

33NiCr [19] — в диапазоне от 36 до 0,3 Гц; сплавов нимоник-105 и IN738C [20] — при частотах от  $10^2$  до  $10^{-4}$  Гц.

Иногда эффект влияния частоты нагружения на сопротивление коррозионно-усталостному разрушению сталей носит немонотонный характер, например, для:

En56С и A533B-1 [21] при изменении частоты от 0,001 до 10 Гц;

аустенитных сталей 316L и 316S16 [22].

Существует предельная частота, ниже которой скорость развития коррозионно-усталост-

ной трещины в сталях типа 12Х2Н или незначительно повышается, или уменьшается [23].

Форма цикла нагружения несущественно влияет на усталость металлических материалов в рабочих средах при низких напряжениях [10, 24], однако при высоких напряжениях ее эффект усиливается. При этом долговечность образцов, испытанных по синусоидальной форме, меньше, чем по прямоугольной или трапецидальной. Исследования гладких образцов из стали 15ХН5ДМФ на отнулевой чистый изгиб показали, что возникновение и распространение усталостной трещины при синусоидальном цикле в морской воде протекают на 10...90 % активнее, чем при трапецидальном. Причем этот эффект повышается с ростом уровня деформации [13].

Увеличение асимметрии цикла обуславливает снижение сопротивления коррозионной усталости материалов [10]. Увеличение асимметрии цикла также обуславливает уменьшение порогового коэффициента интенсивности напряжений  $K_{th}$  и разницы между скоростью продвижения трещины в морской воде и на воздухе [25, 26]. При испытаниях стали 10ХСНД в случае чистого изгиба с частотой 35 Гц в естественной морской воде рост коэффициента асимметрии цикла нагружения не сказывается на зарождении и росте трещин, но приводит к уменьшению их числа. В стали BS 817M40 повышенной чистоты, испытанной на усталость при  $R = 0,1$  и  $0,35$ , до 35 % усталостного излома — это межзеренная составляющая, а при  $R = 0,7$  ее доля около 10 % [27].

Один из важнейших факторов влияния на сопротивление усталости материалов в коррозионной среде — степень ее агрессивности [10]. Во многих случаях наводороживание металлов, особенно в высокопрочных стальях, обладающих повышенной чувствительностью к водородному окрупчиванию, является определяющим при знакопеременном нагружении.

Изучение циклической трещиностойкости коррозионно-стойких сталей 08Х17Т и 12Х18Н10Т при отнулевом цикле с частотой 2,5 Гц показывает, что в наводороженной (однонормальный водный раствор серной кислоты с добавкой 5 мл/л диоксида мышьяка) среде, скорость роста трещин на порядок выше, чем на воздухе. При этом контролирующее влияние оказывает наводороживание при циклическом деформировании, что связано

с резким спадом пластичности на поверхности вследствие адсорбции водорода или охрупчивающим действием поверхностных реакций с оксидированием и высвобождением водорода.

При испытании жаропрочного сплава инконель-718, легированной молибденом стали X20CrMo13 и титана BT1-0, показано, что один из путей увеличения срока службы изделий при усталости в среде — использование материалов с высоким  $K_{th}$  или мероприятий, направленных на его увеличение. Это уменьшает вероятность образования более глубоких трещин, сформировавшихся при фретинге.

При изучении сплава АЦпл выявили одинаковое скольжение и образование трещин как на воздухе, так и в 3%-ном растворе морской соли в воде, хотя в воде и особенно в 3%-ном растворе NaCl эти процессы значительно ускоряются.

Совместное воздействие среды и знакопеременной нагрузки из-за разрушения пассивной пленки и устранения на поверхности барьеров для дислокаций ускоряет микро- и субмикро деформации металла, а пассивация, тормозя выход дислокаций, замедляет развитие коррозионной усталости.

Из-за адсорбционного или адсорбционно-электрохимического воздействия среды начальная фаза коррозионной усталости, как при коррозионном растрескивании, определяется локальным повреждением пассивного слоя поверхности материала. Однако, если в первом случае сначала увеличивается интенсивность транскристаллитного скольжения, и только потом в полосах скольжения возникают ювенильные плоскости металла, то во втором случае свежие поверхности сразу образуются в скоплениях дислокаций.

Усталостное разрушение в присутствии среды начинается в точечных коррозионных повреждениях, возникающих преимущественно у неметаллических включений на стойких полосах скольжения, объем металла которых наиболее активирован и является анодом для близлежащих поверхностей. Далее эти повреждения углубляются из-за локализации напряжений, и интенсивность электрохимических процессов возрастает. Затрудняется закупорка питтингов вторичными продуктами коррозии, замедляющими протекание окисления при знакопеременном нагружении [1].

В образцах без предварительно наведенных трещин на поверхности образуется множество

коррозионно-усталостных микротрещин, расположенных близко друг к другу и совместно влияющих на распределение полей механических напряжений. При этом трещины не прямолинейны, а значительно разветвлены.

Все это затрудняет определение момента зарождения макротрещины для аналитической оценки времени до ее появления.

Развитие трещины отображают кинетической диаграммой усталостного разрушения (КДУР) (рис. 1) [11, 24]. Она представляет собой кривую зависимости скорости роста трещины ( $da/dN$ ) от размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Второй участок КДУР представлен уравнением Пэриса—Эрдогана [11]:

$$da/dN = C\Delta K^n,$$

где  $a$  — длина трещины, м;

$N$  — число циклов нагружения;

$C$  — коэффициент;

$n$  — показатель степени в уравнении;

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$  — амплитуда КИН, МПа·м<sup>1/2</sup>.

Полная КДУР описывается аналитическими зависимостями, учитывающими асимметрию цикла и скорость роста трещин  $\Delta K$  от  $K_{th}$  до  $K_{fc}$  (Формен, Керни, Эрдоган, Г.П. Черепанов, В.Д. Кулиев, С.Я. Ярема, С.И. Микишин и др.).

Степень ускорения роста трещин обусловлена средой испытания и усиливается при

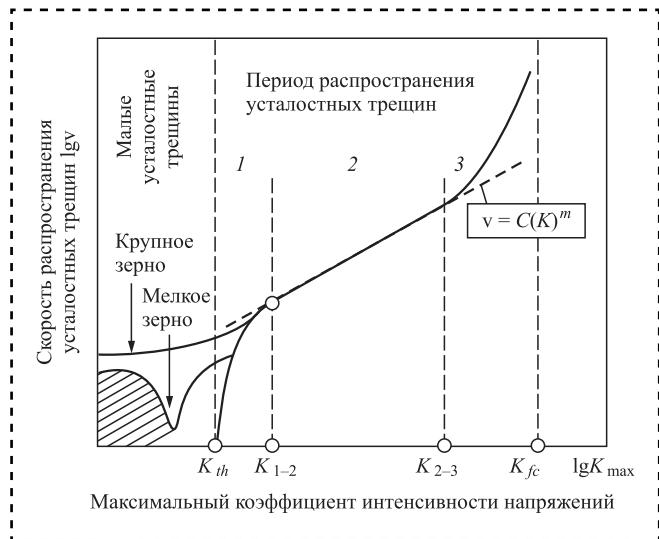


Рис. 1. Схема КДУР:

$\Delta K_{th}$  — пороговый КИН, ниже которого усталостная трещина не распространяется;  $\Delta K_{fc}$  — критический КИН [24]



КИН, близком к  $K_{th}$ . При этом рост трещины в вакууме медленнее, чем на воздухе и, тем более, в коррозионной среде [26].

Особенности конфигурации КДУР в условиях присутствия коррозионных сред многих металлов и сплавов подробно изучены А.Н. Романовым.

В отличие от трещин, развивающихся без участия коррозионных сред, коррозионно-усталостные разрушения имеют свои особенности [11]. Они определяют характер движущих сил и кинетику коррозионных трещин, которые в рамках традиционного анализа механики разрушения не могут быть отражены. Напряженное состояние в вершине коррозионно-усталостной трещины может существенно уменьшиться из-за ее ветвления и затупления (коррозионное разъедание), а также появления фактора закрытия трещин, что способствует релаксации напряжений, т.е. понижению эффективных КИН ( $\Delta K_{itff}$ ), а закрытие трещины — уменьшению эффективного размаха КИН ( $\Delta K_{itff}$ ). Все это влияет на процесс коррозионной усталости.

Для сравнительных испытаний, когда нужно, например, установить влияние среды, концентратора напряжений, термической или другой технологии обработки на сопротивление усталости конструкционных материалов, часто используют относительные величины, например,  $\beta_{th} = \Delta K_{thc}/\Delta K_{th}$  и др. [11].

Однако преимущество такого кинетического подхода проявляется только тогда, когда в металле уже существуют макротрещины, плоскость их развития перпендикулярна к направлению действия нормальных напряжений, а интенсивность напряжений в их вершине поддается контролю. Для гладких образцов без предварительно наведенных трещин на поверхности зарождается сразу большое число коррозионно-усталостных микротрещин, расположенных близко друг к другу и совместно влияющих на распределение полей напряжений [28]. Поэтому оценить интенсивность напряжений в вершине трещин с привлечением существующих методических подходов практически невозможно. Во многих случаях трещины не прямолинейны и значительно разветвлены, что затрудняет применение основных гипотез механики разрушения к аналитическому описанию кинетики усталости в присутствии коррозионной среды.

Экспериментально установлено, что кривые изменения прогиба представляют собой интегральную характеристику деструктивных изменений при знакопеременном нагружении материалов [11, 12].

У материалов после отожига упрочнение сопровождается интенсивным скольжением практически во всех зернах, о чем свидетельствует уменьшение прогиба. Стабилизация прогиба связана с развитым скольжением по вторичным полосам, пересечением полос и заканчивается формированием макротрещины, растущей до разрушения образца [6, 9].

По-другому ведут себя технологически упрочненные материалы, у которых прогиб сразу увеличивается, чему соответствует появление в отдельных зернах редких полос скольжения. Далее в период стабилизации прогиба наблюдается уплотненное скольжение по первичным и вторичным плоскостям. Фаза усиления роста прогиба проявляется формированием на поверхности трещины длиной порядка 1,0 мм.

На рис. 2 приведена типичная кривая прогиба в коррозионной среде (3%-ный водный раствор морской соли) при симметричном консольном изгибе с вращением модельного цилиндрического образца из холоднокатаной латуни Л63 при  $\sigma_a = 250$  МПа. Стрелкой обозначен момент появления макротрещины  $l_{3,тр}$ .

Результаты обработки экспериментальных данных представлены в таблице.

Полная долговечность  $N_p$  и долговечность до появления трещины  $N_{3,тр}$  при испытании на воздухе холоднокатаной латуни Л63 ( $3,41 \cdot 10^5$  и  $2,7 \cdot 10^5$  циклов соответственно) выше, чем у Л63 с деформацией на 25 % ( $1,15 \cdot 10^5$  и  $8 \cdot 10^4$  циклов соответственно). Однако скорость роста трещины в холоднокатаной латуни Л63

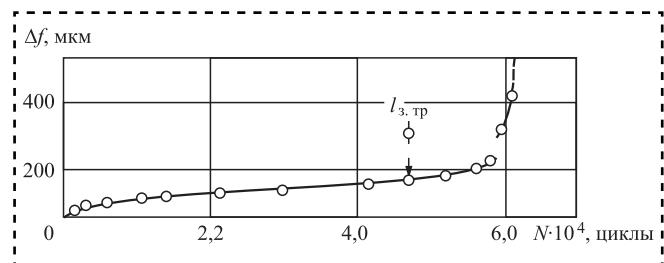


Рис. 2. Схема кривой прогиба модельного образца из холоднокатаной латуни Л63:  
симметричный консольный изгиб с вращением 50 Гц;  
3%-ный водный раствор морской соли

**Параметры кривых прогиба цилиндрических образцов из холоднокатаной и холоднокатаной с деформацией на 25 % латуни Л63 при симметричном консольном изгибе частотой 50 Гц на воздухе и в коррозионной среде**

$\varepsilon_{\text{пр}}$	$N_p$	$N_{z,\text{тр}}$	$N_p - N_{z,\text{тр}}$	$l_s$	$v_{\text{тр}}$
<i>Воздух</i>					
0	341 000	270 000	71 000	3,66	$5,15 \cdot 10^{-2}$
25	115 000	80 000	35 000	3,34	$9,54 \cdot 10^{-2}$
<i>Коррозионная среда</i>					
0	51 000	40 000	11 000	3,10	$48,2 \cdot 10^{-2}$
25	68 100	54 000	14 100	3,31	$23,5 \cdot 10^{-2}$

**Обозначения:** $\sigma_a$  — напряжение,  $\sigma_a = 300$  МПа; $\varepsilon_{\text{пр}}$  — степень деформации на разрывной машине ZD 10/90 при скорости деформирования  $5,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , %; $N_p$  — полная долговечность, цикл; $N_{z,\text{тр}}$  — число циклов до зарождения трещины, цикл; $N_p - N_{z,\text{тр}}$  — число циклов "работы" с трещиной, цикл; $l_s$  — длина чисто усталостной трещины на изломе образца, мм; $v_{\text{тр}}$  — скорость роста трещины, мкм/цикл.

( $5,15 \cdot 10^{-2}$  мкм/цикл) медленнее, чем в холоднокатаной и деформированной латуни Л63 на 25 % ( $9,54 \cdot 10^{-2}$  мкм/цикл).

В коррозионной среде как полная циклическая долговечность, так и долговечность до появления макротрещины ниже, а скорость роста микротрещины выше, чем на воздухе [1, 10, 11, 28].

При испытании в коррозионной среде полная долговечность и долговечность до зарождения трещины холоднокатаной латуни Л63 с дополнительной деформацией на 25 % ( $6,81 \cdot 10^4$  и  $5,4 \cdot 10^4$  циклов соответственно) выше, чем просто холоднокатаной ( $5,1 \cdot 10^4$  и  $4,0 \cdot 10^4$  циклов соответственно). А скорость роста трещины, наоборот, выше у холоднокатаной латуни Л63 ( $48,2 \cdot 10^{-2}$  мкм/цикл) по сравнению с холоднокатаной латунью с дополнительной деформацией на 25 % ( $23,5 \cdot 10^{-2}$  мкм/цикл).

Предпочтение следует отдавать материалам и видам обработки деталей автомобиля, у которых ресурс до зарождения трещины составляет большую часть "жизни" до окончательного разрушения. Это позволит определить дефект во время очередного технического осмотра, что улучшит ремонтопригодность автомобиля.

Таким образом, кривые прогиба образца дают возможность отследить момент появления трещины в процессе усталости и определить скорость ее продвижения, что особенно актуально в случае наличия коррозионной

среды, так как прямое наблюдение за поверхностью образца невозможно.

С помощью полученных данных можно на стадии конструирования сделать оптимальный выбор материала и технологии изготовления деталей, а на стадии проведения технического обслуживания автомобиля предотвратить разрушение элементов конструкции и деталей, находящихся в процессе эксплуатации под действием циклических нагрузок.

## Выводы

Выявлены факторы и дана оценка влияния среды и ее агрессивности, частоты, формы и асимметрии цикла нагружения на сопротивление усталостному разрушению.

Показано, что наличие среды затрудняет определение момента зарождения макротрещины для аналитической оценки времени до ее появления.

Использование кривых прогиба при усталости образцов позволяет зафиксировать момент образования трещины и определить скорость ее дальнейшего продвижения, что дает возможность оптимизировать выбор конструкционных материалов для машин с учетом условий их эксплуатации и обосновывать технологический процесс изготовления в целях снижения материалаомкости, повышения ресурса и ремонтопригодности автомобиля.



## Библиографический список

1. **Пачурин Г.В., Кудрявцев С.М., Соловьев Д.В., Наумов В.И.** Кузов современного автомобиля: материалы, проектирование и производство: учеб. пособие / под ред. Г.В. Пачурина. СПб.: Лань, 2016. 316 с.
2. **Пачурин Г.В., Галкин В.В., Пачурин В.Г.** Долговечность упрочненных металлов и сплавов: учеб. пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2017. 228 с.
3. **Оценка** качества стального проката для холодной объемной штамповки / А.А. Филиппов и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 7. С. 551–556.
4. **Defining Role Metal Performance for cold bolt upsetting (bolt head)** / G.V. Pachurin et al. // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. No. 9 (4).
5. **Filippov A.A., Pachurin G.V., Naumov V.I., Kuzmin N.A.** Low-Cost Treatment of Rolled Products Used to Make Long High-Strength Bolts // Metallurgist. 2016. Vol. 59. No. 9–10. P. 810–815.
6. **Development of fatigue test technology of sheet automobile materials** / G.V. Pachurin et al. // Eastern-european journal of enterprise technologies. Vol. 5. No. 12 (95). 2018. P. 31–37.
7. **Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузмин Н.А.** Способ формирования структурно-механических свойств стального проката для высадки стержневых изделий // Черные металлы. 2018. № 4. С. 36–40.
8. **Пачурин Г.В., Гущин А.Н., Галкин В.В., Пачурин В.Г.** Теоретические основы повышения эксплуатационной долговечности штампованных металлоизделий: учеб. пособие для студентов вузов. Н. Новгород: НГТУ, 2006. 173 с.
9. **Пачурин Г.В.** Сопротивление усталости при разных температурах отожженной и упрочненной латуни Л63 // Международный журнал экспериментального образования. 2014. № 3–1. С. 119–126.
10. **Похмурский В.И.** Коррозионная усталость металлов. М.: Металлургия, 1985. 207 с.
11. **Пачурин Г.В.** Коррозионная долговечность изделий из деформационно-упрочненных металлов и сплавов: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2014. 160 с.
12. **Pachurin G.V.** Life of Plastically Deformed Corrosion-Resistant Steel // Russian Engineering Research. 2012. Vol. 32. No. 9–10. P. 661–664.
13. **Максимович Г.Г., Кобзарук А.В.** Зарождение и развитие трещин малоцикловой усталости в стали 15ХН5ДМФ в морской воде // Физ.-хим. мех. материалов. 1984. Т. 5. № 5. С. 16–20.
14. **Пеи Хонгхун, Янг Йигюн, Ке Веи.** Рост коротких трещин в стали A537CL1 при циклическом напряжении в 3,5%-ном растворе NaCl // Цзиньшуй-снэбао. Acta metallurgica sinica. 1988. 24. № 6. С. B393–B397.
15. **Nakai Yoshikazu, Akagi Hedenari, Kitamura Yasuhiro, Ohji Kiyotsugu.** Рост коротких поверхностных трещин в высокопрочной низкоуглеродистой стали при циклическом нагружении в 3,5%-ном рас-
- творе NaCl // Нихон кикай таккай ромбунсю. Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. 1989. Т. 55. № 516. С. 1724–1731.
16. **Komai Kenjiro, Kanasari Hiroshi.** Corrosion fatigue crack growth of a martensitic stainless steel in NaCl solution. // Bull. JSME. 1985. 28. №. 236. P. 202–208.
17. **Nishiyama Satashi, Abe Takayuki, Mashuda Chitoshi, Hirukawa Hisashi.** Характеристики коррозионной усталости и влияния на нее частоты для низколегированных сталей в соленой воде при вращении изгибом // Нихон кикай таккай ромбунсю. Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. 1985. А. 51. № 461. С. 156–160.
18. **Nagai Kin-ichi.** Коррозионная стойкость и механика разрушения // Есэцу гаккайси. J. Jap. Weld. Soc. 1976. 55. № 11. P. 926–937.
19. **Schmidtman Eugen, Wirths Dieter Aachen.** Влияние частоты нагружения на характеристики распространения трещины в высокопрочной стали 33NiCrMo145 в условиях пульсирующего растяжения в различных средах // Arch Fisenhuttenw. 1973. 49. № 10. P. 483–437.
20. **Pettit D.E., Ryder J.T., Krupp W.E., Hoeppner Scarlin R.B.** Влияние частоты нагружения и среды на рост трещины при высокотемпературной усталости сплавов на основе никеля // Adv. Res. Strength Fract. Mater. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Fract. Waterloo. 1977. New York e.a. 1978. P. 349–857.
21. **Atkinson J.D., Lindley T.C.** Влияние частоты [нагружения] и температуры на рост усталостной трещины при воздействии среды в сталях [при напряжениях] ниже KISCC // Influence Environment Fatigue Conf. London, 1977. P. 65–74.
22. **Smethurst E., Waterhouse R.B.** Effect of frequency on the fretting fatigue behaviour of two austenitic stainless steel implant materials in Hanks solution // Proc. 2<sup>th</sup> Int. Conf. Mech. Behav. Mater. Boston. 1976. S. 1. 1976. P. 695–699.
23. **Магденко А.Н., Садыченко В.И.** Влияние формы цикла на скорость роста коррозионной трещины в стали типа 12Х2Н при малоцикловой усталости // Физ.-хим. мех. материалов. 1984. № 5. С. 102–103.
24. **Терентьев В.Ф., Петухов А.Н.** Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ИМЕТ РАН — ЦИАМ, 2013. 515 с.
25. **Chen Daolun, Wang Zhongguang, Jiang Xiaoxia, Ai Suhua, Shi Changxu.** Рост усталостной трещины в прокатанной двухфазной стали // Steel Res. 1989. 59. № 7. P. 319–322.
26. **Sumita Masae, Maruyama Norio.** Распространение усталостных трещин в сплаве Ti—6Al—4V в морской воде при малых значениях ЛК // Тэцу то хаганэ. J. Iron and Steel Inst. Jap. 1989. 74. № 9. P. 1854–1861.
27. **Irving P.E., Kurzfeld A.** Измерения межзеренного разрушения, возникающего в процессе развития усталостной трещины в закаленных и отпущеных сталях // Metal Sci. 1978. 12. № 11. P. 495–502.
28. **Пачурин Г.В.** Роль структуры поверхности в коррозионной усталости деформированных металлических материалов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1.

# СОЕДИНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

УДК 621.757

**С.В. Кузнецова, канд. техн. наук, А.Л. Симаков, д-р техн. наук**  
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)  
E-mail: svkuznecova@gmail.com

## Условия автоматизированного согласования взаимного положения сборочных компонент

Предложено формализованное описание на основе теории множеств процесса совмещения деталей при сборке. Сформулированы и обоснованы необходимое и достаточное условия автоматизированного согласования взаимного положения сборочных компонент: необходимое условие автоматизированного согласования — реализация сборочным устройством целенаправленного перемещения сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей по программным траекториям совмещения; достаточное — монотонное убывание погрешности ориентации сопрягаемых поверхностей при перемещении детали по программной траектории совмещения.

*The formalized description of the details' overlapping process at assembly with using of the multitudes' theory is offered. The necessary and sufficient conditions of the automated coordination of the assembly components' mutual position are formulated and proved. The necessary condition of the automated coordination is realization of purposeful moving of details' connecting surfaces on program trajectories of overlapping by the assembly device. The sufficient condition of the automated coordination is the monotone decrease of orientation's error of connecting surfaces at detail's moving on the program trajectory of overlapping.*

**Ключевые слова:** погрешность ориентации, програмная траектория совмещения, сборочные компоненты, сопрягаемые поверхности деталей, условия автоматизированного согласования.

**Keywords:** orientation error of orientation, program trajectory of overlapping, assembly components, details' connecting surfaces, conditions of the automated coordination.

### Введение

Автоматизированный режим согласования взаимного положения соединяемых деталей может быть реализован при выполнении сборочной системой определенных условий. Ручное или механизированное соединение деталей невозможно без соблюдения условий собираемости [1]. Переход к автоматизированной сборке означает выполнение автоматической системой управления сборочного оборудования ряда функций оператора (сборщика). Поэтому условия автоматизированного согласования взаимного положения сборочных компонент могут быть найдены из формализованного описания функций автоматизированной сборочной системы по управлению ориентацией соединяемых деталей.

Воспользуемся понятиями необходимости и достаточности для формализованного определения условий автоматизированного совмещения деталей. Эти понятия предполагают связь между условием  $X$  и заключением  $Z$  некоторого утверждения в виде: "если  $X$ , то  $Z$ ". При этом, если утверждение верно, то условие  $X$  достаточно для  $Z$ , а условие  $Z$  необходимо для  $X$  [2].

### Формализация процесса совмещения деталей при сборке

Для формализации процесса последовательного изменения состояний системы поставим в соответствие каждой сопрягаемой поверхности соединяемой и базовой деталей множество, описывающее ее геометрические



параметры (в качестве элементов множества могут быть приняты, например, координаты точек сопрягаемых поверхностей деталей в неподвижной декартовой системе координат).

Считаем, что в начальный момент времени  $t = 0$  сопрягаемые поверхности соединяемой и базовой деталей описываются, соответственно, множествами точек:

$$\begin{aligned} A_0 &= \{a_i\}; a_i = \{x_i, y_i, z_i\}; i = 1, \dots, n; \\ B_0 &= \{b_j\}; b_j = \{x_j, y_j, z_j\}; j = 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (1)$$

Условие несовпадения сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей записывается как непересечение множеств:

$$A_0 \cap B_0 = \emptyset,$$

где  $\emptyset$  — пустое множество.

Условие полного согласования — строго определенная ориентация соединяемых деталей. Обозначим множества, соответствующие положениям сопрягаемых поверхностей в собранном узле,  $A$  и  $B$ , а множество точек контакта поверхностей —  $C$ . Элементы этого множества принадлежат одновременно и множествам  $A$  и  $B$ :

$$C = \{c : c \in A \wedge c \in B\}. \quad (2)$$

Множество  $C$  является пересечением множеств  $A$  и  $B$ :

$$C = A \cap B.$$

При полном согласовании сопрягаемых поверхностей множество  $C$  совпадает, по крайней мере, с одним из множеств  $A$  или  $B$  и является подмножеством другого:

$$C = A; A \subset B : B = A \cup \Delta = C \cup \Delta, \quad (3)$$

где  $\Delta$  — дополнение  $A$  в  $B$ , множество, соответствующее зазорам между сопрягаемыми поверхностями.

Поскольку в начальный момент времени множества  $A_0$  и  $B_0$  не пересекаются, то результат сборочной операции может быть достигнут только за счет преобразования исходных множеств в множества  $A$  и  $B$ . Будем полагать, что в процессе сборки множество  $B$ , описывающее геометрию базовой сопрягаемой поверхности не изменяется:

$$\forall t \in T : B_0 \equiv B, \quad (4)$$

где  $T$  — длительность сборочной операции.

Поэтому основная функция автоматизированного сборочного устройства будет состоять в преобразовании множества  $A_0$  в некоторое множество  $D$  в соответствии с оператором  $H_A$ :

$$\forall t \in T : \exists H_A : A_0 \rightarrow D \text{ или } D = H_A A. \quad (5)$$

В силу ограничений на возможности сборочного устройства реализация этой функции может обеспечиваться в виде совокупности последовательных преобразований, описываемых последовательностью линейных операторов  $H_{A1}, H_{A2}, \dots, H_{Ak}$ :

$$\begin{aligned} \exists H_{A1} : A_0 &\rightarrow D_1; t_0 \leq t < t_1; \\ \exists H_{A2} : D_1 &\rightarrow D_2; t_1 \leq t < t_2; \\ \exists H_{Ak} : D_{k-1} &\rightarrow D; t_{k-1} \leq t \leq T, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $t_1, t_2, \dots, t_{k-1}$  — моменты времени, определяющие длительность преобразований соответствующими линейными операторами.

Разделение времени выполнения сборочной операции на последовательные интервалы может соответствовать реализации сборочным устройством различных этапов сборочной операции или различных режимов работы:

$$\begin{aligned} \forall t \in T : B_0 &\equiv B; \forall t \in T : \exists H_A : A_0 \rightarrow D \text{ или} \\ D &= H_A A_0; H_A = H_{A1} \vee H_{A2} \dots \vee H_{Ai} = \bigcup_{j=1}^{j=i} H_{Aj}. \end{aligned}$$

### Необходимое условие автоматизированного согласования взаимного положения сборочных компонент

Будем считать, что полное совмещение сопрягаемых поверхностей для соединяемых деталей достигнуто, т.е. соотношения (3) выполнены. При этом выполнены начальные условия (1) и допущение (4).

Если для  $t = T$

$$\exists A : A \subset B; A \cap B = C; C \equiv A;$$

для  $t = 0$

$$A_0 \cap B = \emptyset,$$

то

$$\exists G_A : A \rightarrow A_0; \forall t \in T,$$

где  $G_A$  — линейный оператор, преобразующий множество  $A$  в  $A_0$ .

Очевидно, что может существовать бесконечное множество линейных операторов  $G_A$ , если не оговорены какие-либо ограничения.



ния, кроме начальных условий и конечного результата. Введение этих ограничений возможно при рассмотрении конкретных математических моделей сборочных устройств. Поскольку  $G_A$  является линейным оператором, для него может быть найден линейный оператор  $F_A$ , выполняющий обратное преобразование  $F_A: A_0 \rightarrow A$ . В том случае, если линейные операторы представлены в форме матриц однородных координат (матрицы линейных и угловых перемещений размером  $4 \times 4$ ) определение оператора  $F_A$  проводится обращением матрицы оператора  $G_A$ . Так как определитель матрицы однородных координат не может равняться нулю, для любого линейного оператора  $G_A$  существует оператор  $F_A$ , выполняющий обратное преобразование множеств. В трехмерном пространстве линейный оператор имеет вид матрицы преобразования координат  $M_k$ :

$$G_A = \prod_{k=1}^i M_k; \forall k \det M_k \neq 0;$$
$$\exists F_{A_j} = M_k^{-1}; \exists F_A = \bigcup_{j=1}^i F_{A_j}; A = F_A A_0,$$

где  $F_A$  — единственный линейный оператор.

Поскольку  $F_A$  может быть представлен в виде произведения нескольких матриц  $F_{A_j}$ , существует множество вариантов этого произведения. Каждый вариант определяет изменение векторов из состояния  $A_0$  в состояние  $A$ , т.е. программную траекторию совмещения. Таким образом, существует множество программных траекторий совмещения сопрягаемых поверхностей деталей. Если условия (6) выполнены, то  $D \subset A \subset B$ . Следовательно,  $H_A A_0 \subset F_A A_0$  или  $H_A \subset F_A$ .

Таким образом, условие принадлежности реализуемых устройством траекторий множеству программных траекторий совмещения является необходимым условием согласования взаимного положения сборочных компонент.

Существование линейного оператора  $F_A$  обеспечивает реализацию в трехмерном пространстве программной траектории перемещения сопрягаемых поверхностей соединяемой детали, т.е. определяет необходимые степени подвижности и управляемые координаты соединяемой детали. Физическая реализация линейного оператора преобразования множества — фактор, определяющий степень автоматизации совмещения поверхностей деталей.

Переходя от понятий теории множеств к терминам теории автоматического управления, полученное соотношение можно сформулировать следующим образом: необходимым условием автоматизированного согласования взаимного положения сборочных компонент является реализация сборочным устройством целенаправленного перемещения сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей по программным траекториям совмещения.

### Достаточное условие автоматизированного согласования взаимного положения сборочных компонент

Из необходимости этого условия следует, что оно обязательно должно выполняться при полном совмещении сопрягаемых поверхностей. Условие, при выполнении которого достигается результат сборочной операции — полное согласование сопрягаемых поверхностей сборочных компонент, является достаточным, и оно не совпадает с необходимым.

Для формализации достаточных условий автоматизированного совмещения сопрягаемых поверхностей рассмотрим ограничения на реализацию оператора линейного преобразования. Будем считать, что оператор линейного преобразования обеспечивает последовательность (6) состояний множества  $A_0$ :

$$A = \langle A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A \rangle; \forall t \in T. \quad (7)$$

Конечное состояние множества  $A$  удовлетворяет условиям пересечения с множеством  $B$  (3), обеспечивающим полное совмещение сопрягаемых поверхностей. Для промежуточных состояний множества  $A$  также можно задать последовательность множеств  $A^*$ , для которых должны выполняться аналогичные условия пересечения:

$$\exists A^* = \langle A_1^*, A_2^*, \dots, A_k^*, \dots, A^* \rangle; A^* = B; \forall t \in T; \quad (8)$$

$$A_k \cap A_k^* = A_k; A_k \subset A_k^*; A_k^* = A_k \cup \Delta_k.$$

При этом каждое из множеств  $A^*$  может рассматриваться как область возможных состояний соответствующего множества  $A$ , а каждое из множеств  $\Delta$  — как область допустимых отклонений в состоянии соответствующего множества  $A$ . Для последнего преобразования множества  $A$  областью возможных состояний является множество  $B$ , а областью допу-



стимых отклонений — множество  $\Delta$ . Количественная оценка множества проводится по числу элементов, составляющих это множество. В случае бесконечного числа элементов для множеств, описывающих топологические (метрические) пространства, используется понятие мощность множества [3]. При этом два множества называются эквивалентными (имеющими равное число элементов), если между ними можно установить взаимно однозначное соответствие. В нашем случае множества  $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A$  эквивалентны:

$$|A_1| = |A_2| = \dots = |A_k| = \dots = |A|. \quad (9)$$

Мощность каждого из множеств  $\Delta_i$  является характеристикой точности преобразования предыдущего состояния множества  $A_{i-1}^*$  в последующее  $A_i^*$ . Функция преобразования этих множеств отличается от функции  $F_{Ai}$ . Поэтому множества  $A^*$  в общем случае не эквивалентны.

Будем считать, что любое из множеств  $A_i^*$  представляет собой объединение возможных состояний множества  $A_i^j$ , удовлетворяющих условиям пересечения множеств  $B$  и  $A_i^*$ . Возможные состояния множества  $A_i^j$  могут быть получены из некоторого состояния  $A_i^1$ , принятого за исходное, путем линейных преобразований:

$$\begin{aligned} \exists H_k^j : A_k^1 \rightarrow A_k^j; A_k^j = H_k^j A_k^1; \\ A_k^* = \bigcup_{j=1}^p A_k^j; j = 1, 2, \dots, p. \end{aligned} \quad (10)$$

Для двух последовательных состояний  $A_{i-1}^*$  и  $A_i^*$  оценим соотношение мощностей этих множеств. При объединении множеств в соответствии с формулами (10) возникает пересечение множеств, полученных в результате линейных преобразований. Это связано с тем, что все множества  $A_{i-1}^j$  и  $A_i^j$  должны пересекаться с множеством  $B$ , образуя множество  $C_i$ . Чем больше мощность множества  $C_i$ , тем больше ограничения на возможные состояния множеств  $A_i^j$  и на функции линейных операторов  $H_i^j$ . В пределе при  $t = T$  мощность множества  $C$  равна мощности множества  $A$ , а мощность множества  $A^*$  равна мощности множества  $B$ . Мощность множества  $A_i^*$  определяем по формуле:

$$|A_k^*| = \sum_{j=1}^p |A_k^j| - |D_k|, \quad (11)$$

где  $D_i$  — множество, образованное пересечением множеств  $A_i^j$ .

Считая число возможных состояний  $p$  множества  $A$  для рассматриваемых этапов совмещения одинаковым и с учетом эквивалентности множеств  $A$  из выражения (9) получим:

$$\sum_{j=1}^p |A_{k-1}^j| = \sum_{j=1}^p |A_k^j|. \quad (12)$$

При возрастании мощности множества  $C$  мощность множества  $D$  также возрастает, поскольку возрастают ограничения на пространство возможных состояний множества  $A$ :

$$|D_{r-1}| < |D_k|.$$

Следовательно,  $|A_{k-1}^*| > |A_k^*|$ .

С учетом зависимостей (8), (9) запишем:

$$|\Delta_{k-1}| > |\Delta_k| \dots > \Delta.$$

Полученное условие определяет соотношение между областями допустимых отклонений в состояниях множества  $A$  для последовательных этапов совмещения соединяемых деталей. Таким образом, совмещение сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей будет обеспечено, если при перемещении детали по программной траектории, задаваемой оператором  $F_A$  линейных преобразований множества  $A$ , отклонения состояния этого множества для любых моментов времени  $t \in T$  от номинального состояния образуют монотонно убывающую последовательность. Значения этих отклонений могут быть представлены в виде функции собираемости, т.е. в виде зависимости допустимых рассогласований координат адаптации от значения координаты совмещения или от времени.

Сформулируем доказанное утверждение следующим образом. Если отклонения состояния множества  $A$  от номинального в процессе преобразования оператором  $F_A$  образуют монотонно убывающую последовательность (условие  $X$ ), то совмещение соединяемых деталей будет обеспечено (заключение  $Z$ ). То есть условие  $X$  — монотонное убывание отклонений преобразованного состояния множества  $A$  от номинального достаточно для  $Z$ -обеспечения совмещения соединяемых деталей. При автоматическом управлении ориентацией соединяемой детали (т.е. при реали-



зации оператора преобразования  $F_A$  состояний множества  $A$ ) отклонения преобразованных состояний от номинального представляют собой погрешности в ориентации соединяемой детали. С учетом этого, достаточное условие автоматизированного согласования взаимного положения сборочных компонент может быть сформулировано в виде: для автоматизированного согласования достаточным условием является монотонное убывание погрешности ориентации сопрягаемых поверхностей, обеспечиваемой системой управления при перемещении детали по программной траектории совмещения.

### Заключение

Формализованное описание процесса совмещения деталей при сборке с использованием теории множеств позволило сформулировать

условия автоматизированного согласования взаимного положения сборочных компонент. Необходимым условием автоматизированного согласования является реализация сборочным устройством целенаправленного перемещения сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей по программным траекториям совмещения; достаточным — монотонное убывание погрешности ориентации сопрягаемых поверхностей при перемещении детали по программной траектории совмещения.

### Библиографический список

1. Гусев А.А. Адаптивные устройства сборочных машин. М.: Машиностроение, 1979. 208 с.
2. Мантуров О.В., Матвеев Н.Н. Курс высшей математики. М.: Высшая школа, 1986. 480 с.
3. Математический энциклопедический словарь / гл. ред. Ю.В. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1988. 847 с.



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"  
продолжает подписку на журнал

### "СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

- За наличный и безналичный расчет.
- С любого номера и на любой срок.
- Без почтовых наценок.

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией  
в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2  
Тел.: 8 (495) 785-60-69  
e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru), [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)

# ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

УДК 678.073:661.481

**С.В. Панин, д-р техн. наук, Л.А. Корниенко, канд. физ.-мат. наук**  
(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск),  
**Хуан Цитао, Д.Г. Буслович, В.О. Алексенко** (Томский политехнический университет)  
E-mail: rosmc@ispms.tsc.ru

## Механические и триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ со стекловолокном, функционализированным силансодержащими модификаторами (часть 2)\*

Исследованы механические и триботехнические характеристики композитов на основе СВМПЭ с различным исходным размером полимерного порошка, наполненных рубленым стекловолокном, функционализированным силансодержащим модификатором KH550 в целях увеличения адгезии к полимерной матрице. Показано, что исходный размер порошка при равной молекулярной массе определяет характер распределения стекловолокон в матрице и, как следствие, механические и триботехнические свойства композитов. Выявлено, что более высокими трибомеханическими характеристиками обладают стеклопомпозиты на основе мелкодисперсного порошкового СВМПЭ фирмы Ticona GUR-2122.

*Mechanical and tribotechnical properties of UHMW-PE based composites with different initial size of the polymer powder filled with chopped glass fibers functionalized with silane-containing modifier KH550 to increase adhesion to the polymer matrix were studied. It is shown that the various initial size of the powder at an equivalent molecular weight determines the pattern of glass fiber distribution in the matrix, and, as a consequence, the mechanical and tribotechnical properties of the composites. It was revealed that glass fiber reinforced composite based on fine powder UHMW-PE grade GUR-2122.*

**Ключевые слова:** сверхвысокомолекулярный полиэтилен, стекловолокно, компатибилизатор, прочность, износостойкость, надмолекулярная структура.

**Keywords:** ultra-high molecular weight polyethylene, microfiller, compatibilizer, strength, wear resistance, percolative structure.

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) обладает рядом уникальных свойств (износостойкость, низкий коэффициент трения, биоинертность), определяющих его исключительные области промышленного и медицинского применения. СВМПЭ, обладая достаточно высокими характеристиками прочности, а также низким коэффициентом

трения, высокой износо- и химической стойкостью в агрессивных средах, находит применение в узлах трения машин и механизмов, а также в медицине для изготовления ортопедических имплантатов [1–5]. Стекловолокно широко используют в качестве наполнителя для полимерных композиционных материалов, прежде всего для повышения их механических свойств [6, 7]. Однако неполярная природа СВМПЭ обуславливает низкую межфазную адгезию [8], поэтому обработка стекловолокон с помощью силансодержащих модификаторов позволяет улучшить сцепление между компонентами, одновременно повышая механические и триботехнические свойства СВМПЭ-композитов.

\* Работа выполнена в рамках плана фундаментальных научных исследований государственных академий наук 2013–2020 гг., а также поддержана грантом президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-5875.2018.8. Авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку данных исследований, выполненных в рамках проекта № 18-58-00037.

В работе [8] исследованы трибомеханические характеристики композитов на основе СВМПЭ со стекловолокнами, функционализированными различными промышленно выпускаемыми силансодержащими модификаторами.

Наиболее эффективным промышленным аппретом является КН550, обеспечивающий высокие триботехнические свойства стеклокомпозита в широком интервале нагрузок и скоростей скольжения. Эти исследования проведены на композитах, полученных на основе мелкопорошкового СВМПЭ (размер порошка GUR-2122 составляет 5 мкм). Между тем в научной литературе имеется множество работ по разработке нано/микрокомпозитов на основе СВМПЭ с крупным исходным размером порошка [9, 10], однако вопрос влияния исходного размера порошка матрицы на распределение наполнителей и трибомеханические свойства композитов остается мало изученным.

Цель работы — изучить влияние исходного размера порошка СВМПЭ на структуру и трибомеханические характеристики композитов со стекловолокном, функционализированным силансодержащим модификатором; провести сравнительный анализ механических и триботехнических характеристик композитов на основе двух исходных порошков GUR-2122 и GUR-4120 в различных условиях трибонагружения.

### Методика проведения исследований и полученные результаты

Использовали порошки СВМПЭ фирмы Ticona GUR-2122 с молекулярной массой 4,5 млн г/моль и размером отдельных частиц 5 мкм (слабо агломерированных в крупные фрагменты размером до 120...150 мкм), GUR-4120 с молекулярной массой 4,5 млн г/моль и размером порошка 180 мкм, рубленые стекловолокна (PCB) длиной 2 мм (ООО "Графит Про", Москва); силансодержащий модификатор КН550 (Дунгуань, Китай), представляющий собой 3-аминопропилтриэтоксисилан ( $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ ).

Для удаления изначально содержащегося на поверхности стекловолокон (технологического) замасливания их отжигали на воздухе при температуре 300 °C.

Функционализацию PCB осуществляли обработкой в водно-этанольных (рН = 4,5...5,5) растворах каждого из силансодержащих модификаторов при комнатной температуре и непрерывном перемешивании в течение 30 мин. Содержание реагента составляло 1 % от массы наполнителя (0,1 % мас. от общей массы). Затем суспензию, содержащую, в том числе, отожженные стекловолокна, высушивали в тепловом шкафу при температуре 100 °C до полного выпаривания жидкости.

Объемные образцы композитов получали горячим прессованием с помощью пресса МС-500 в пресс-форме, обогреваемой кольцевой разъемной печью с цифровым управлением (ООО "ИТМ", г. Томск). Давление при компрессионном спекании составляло 10 МПа; температура — 200 °C; скорость последующего охлаждения — 3...4 °C/мин. Износостойкость образцов в режиме сухого трения определяли по схеме "вал—колодка" при нагрузках на образец размером  $15,8 \times 6,4 \times 10,0$  мм<sup>3</sup> 60 и 140 Н и скоростях скольжения 0,3 и 0,5 м/с на машине трения 2070 CMT-1 (согласно ASTM G99/DIN 50324). Диаметр контртела (вала) из стали ШХ15 составлял 35 мм. Величину объемного износа определяли по глубине дорожки трения с помощью контактного профилометра Alpha-Step IQ (KLA-Tencor). Коэффициент трения — с помощью трибометра CSEM CH 2000 (по схеме "шар-по-диску"; нагрузка  $P = 5$  Н, скорость скольжения  $v = 0,3$  м/с). Структурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 при ускоряющем напряжении 20 кВ по поверхностям скола, полученным механическим разрушением образцов с надрезом, предварительно выдержаных в жидком азоте.

На рис. 1 приведены микрофотографии исходных порошков СВМПЭ, использованных

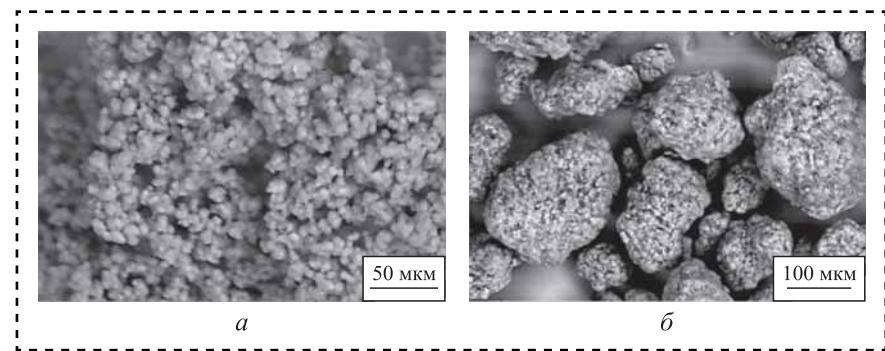


Рис. 1. РЭМ-фотографии исходных порошков СВМПЭ GUR-2122 (а) и GUR-4120 (б)



Таблица 1

Физико-механические свойства СВМПЭ и композитов на их основе с массовой долей 10 % рубленых стекловолокон

Композит	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Шор D	E, МПа	$\sigma_t$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\varepsilon$ , %
СВМПЭ (GUR-2122)	0,934	57,7 ± 0,6	711 ± 40	21,6 ± 0,6	42,9 ± 3,1	485 ± 28
GUR-2122 + PCB	1,001	58,0 ± 0,5	957 ± 82	23,7 ± 1,5	24,9 ± 1,3	198 ± 23
GUR-2122 + PCB (отожженные)	0,999	58,8 ± 0,5	1038 ± 17	22,8 ± 1,2	34,2 ± 0,6	363 ± 22
GUR-2122 + PCB (аппрат-КН550)	1,000	61,4 ± 0,5	1463 ± 95	40 ± 3,0	33,9 ± 3,7	263 ± 32
СВМПЭ (GUR-4120)	0,924	55,9 ± 0,6	624 ± 61	20,2 ± 0,8	33,7 ± 4,1	420 ± 33
GUR-4120 + PCB	0,998	56,9 ± 0,5	907 ± 167	19,4 ± 0,8	30,2 ± 1,5	412 ± 19
GUR-4120 + PCB (отожженные)	0,992	58,6 ± 0,6	1077 ± 132	21,7 ± 1	28,5 ± 1,9	367 ± 13
GUR-4120 + PCB (аппрат-КН550)	0,983	60,1 ± 0,6	1094 ± 60	26,8 ± 1,5	33,9 ± 0,8	373 ± 16

для получения стеклокомпозитов. Проведен предварительный отжиг стекловолокна с последующей функционализацией с помощью наиболее эффективного аппрета КН550 [8].

В табл. 1 представлены физико-механические свойства СВМПЭ и композитов на их основе, содержащих 10 % мас. стекловолокон в необработанном состоянии, после отжига и после функционализации аппретом КН550.

Механические характеристики (твердость, модуль упругости, предел текучести, предел прочности, удлинение до разрушения) ниже для СВМПЭ и композитов на его основе, полученных из крупнодисперсного порошка GUR-4120 на 10...30 %. Эта разница в свойствах особенно существенна для композитов с аппретированым стекловолокном (рис. 2). Представленные на рис. 3 фотографии разрушенных образцов свидетельствуют о возникающей при разрывных испытаниях неоднородности (в том числе пористости) образцов композитов на основе крупнодисперсного порошка GUR-4120 (рис. 3, e, з).

Исследования надмолекулярной структуры композитов на основе мелко- и крупнодисперсного порошка СВМПЭ показали, что в образцах из крупнодисперсного порошка GUR-4120 формируются сферолиты размером несколько сот микрометров, тогда как в мелкодисперсном GUR-2122 надмолекулярная сферолитная структура однородная с размером сферолитов порядка 50...100 мкм (рис. 4, а, б). При

этом кристалличность в образцах GUR-2122 составляет 56,5 %, а GUR-4120 — 30,5 %. Эта разница в формировании структур мелко- и крупнодисперсного СВМПЭ проявляется и в композитах на их основе. Так, в композитах на основе GUR-2122 сферолитная структура формируется до 10 % наполнения матрицы стекловолокнами [11]. При этом сферолиты при кристаллизации свободно "огибают" волокна, обеспечивая равномерное их распределение в матрице (см. рис. 3, д, ж). Исходное (замасленное, не отожженное волокно) распределяется в виде пучков (рис. 3, в и рис. 4, в). В композитах на основе крупнодисперсного порошка GUR-4120 наличие стекловолокон подавляет формирование и рост сферолитов (рис. 4, е, з), располагаясь неоднородно преимущественно вдоль границ крупных частиц порошка СВМПЭ, что сопровождается, в том числе, высокой пористостью композита (рис. 4, ж и рис. 3, з).

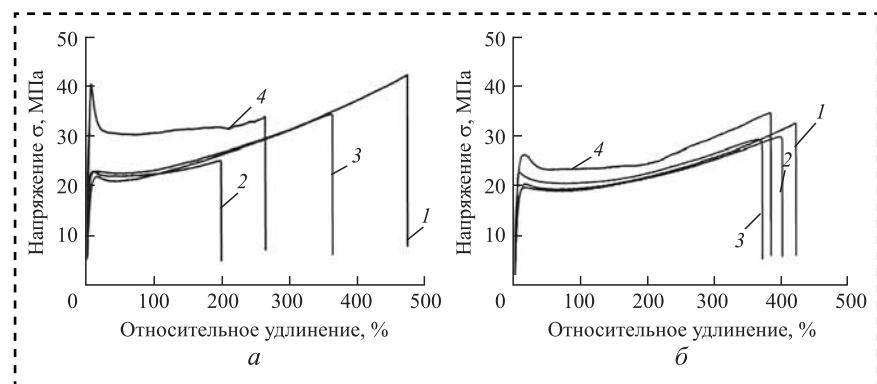


Рис. 2. Диаграммы нагружения GUR-2122 (а) и GUR-4120 (б) и композитов на его основе:

1 — СВМПЭ; 2 — СВМПЭ + PCB (исходные); 3 — СВМПЭ + PCB (отожженные); 4 — СВМПЭ + PCB (аппрат — КН550); массовая доля PCB — 10 %

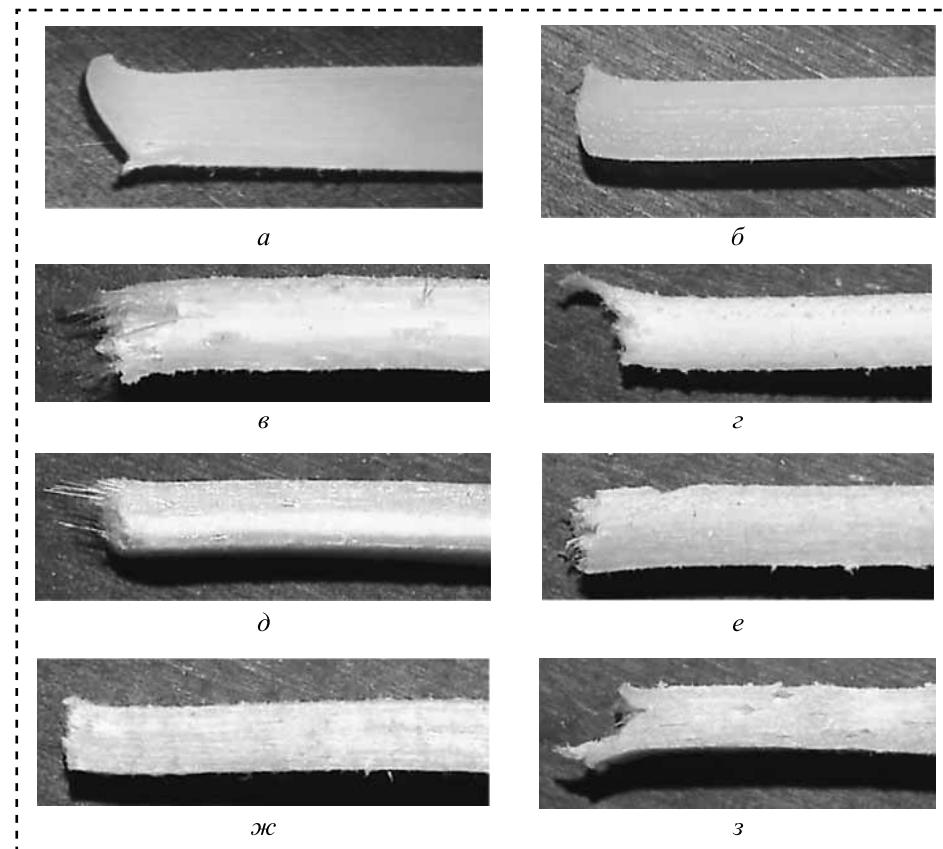


Рис. 3. Фотографии образцов ( $\times 400$ ), разрушенных в результате разрывных испытаний СВМПЭ и композитов на его основе:

а — GUR-2122; б — GUR-4120; в — GUR-2122 + PCB (исходные); г — GUR-4120 + PCB (исходные); д — GUR-2122 + PCB (отожженные); е — GUR-4120 + PCB (отожженные); ж — GUR-2122 + PCB (аппрат — KH550); з — GUR-4120 + PCB (аппарат — KH550); массовая доля PCB — 10 %

Таким образом, размер исходного порошка СВМПЭ (GUR-2122 и GUR-4120) при идентичной молекулярной массе определяют распределение стекловолокна в матрице, формирование надмолекулярной структуры и, как следствие, уровень механических характеристик стеклокомпозитов на их основе.

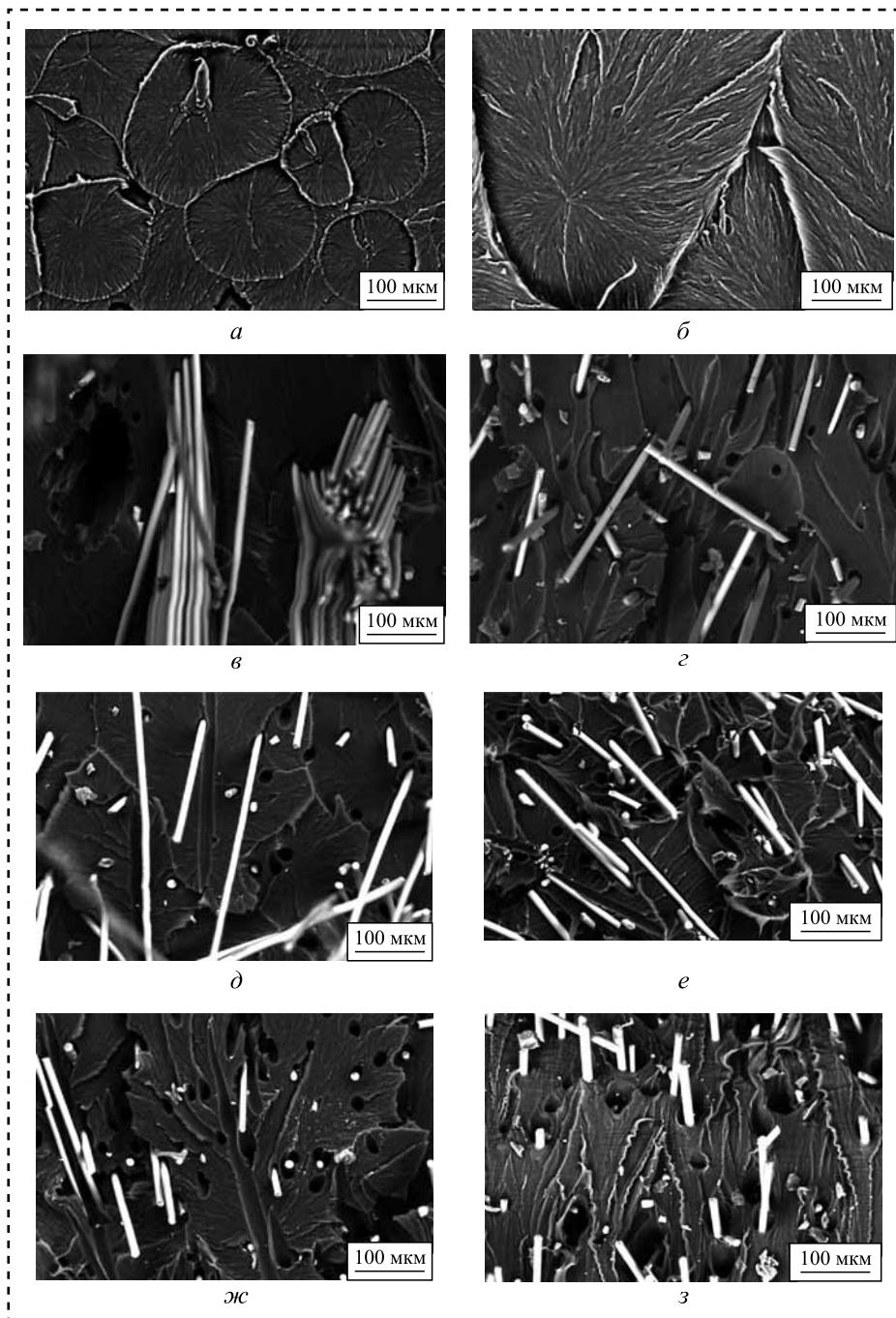
Исследовали триботехнические характеристики стеклокомпозитов на основе СВМПЭ с различным исходным размером порошка при разных условиях трибонагружения ( $P^*v$ ). В табл. 2 приведены триботехнические характеристики стеклокомпозитов, определенные в условиях испытаний "шар-по-диску". Изнашивание как исходной матрицы GUR-4120, так и композитов на ее основе выше, чем на основе мелкодисперсной порошковой матрицы GUR-2122. Коэффициент трения в композите с функционализированным волокном практически вдвое выше такового на основе мелкопорошкового GUR-2122.

Коэффициент трения более стабилен на всем пути трибоиспытаний для композитов на основе крупнодисперсной порошковой матрицы (рис. 4, в, г). Наибольший эффект влияния размерности исходного порошка на триботехнические свойства проявляется в композитах с функционализированным стекловолокном, что обусловлено, по-видимому, не только высокой адгезией аппретированных волокон с матрицей [8], но и различным распределением аппретированных волокон в мелко/крупнодисперсно порошковых матрицах СВМПЭ.

В целях выявления интервала стойкости разрабатываемых композитов для применения в трибоузлах исследованы триботехнические характеристики всех композитов в различных условиях трибонагружения ( $P = 60$  и  $140$  Н,  $v = 0,3$  и  $0,5$  м/с). На рис. 5 и в табл. 3 приведены

Таблица 2  
Коэффициент трения и износ композитов на основе СВМПЭ с массовой долей 10 % стекловолокон (схема "шар-по-диску")

Композит	Коэффициент трения $f$	Износ, $\text{мм}^3$
GUR-2122	$0,102 \pm 0,003$	$0,136 \pm 0,024$
GUR-4120	$0,095 \pm 0,005$	$0,163 \pm 0,015$
GUR-2122 + PCB	$0,057 \pm 0,011$	$0,101 \pm 0,01$
GUR-4120 + PCB	$0,070 \pm 0,003$	$0,117 \pm 0,013$
GUR-2122 + PCB (отожженный)	$0,069 \pm 0,004$	$0,121 \pm 0,01$
GUR-4120 + PCB (отожженный)	$0,064 \pm 0,005$	$0,134 \pm 0,018$
GUR-2122 + PCB (аппарат-KH550)	$0,079 \pm 0,010$	$0,071 \pm 0,01$
GUR-4120 + PCB (аппарат-KH550)	$0,131 \pm 0,007$	$0,102 \pm 0,034$



**Рис. 4. РЭМ-фотографии надмолекулярной структуры СВМПЭ и композитов на его основе:**

*а* — GUR-2122; *б* — GUR-4120; *в* — GUR-2122 + PCB (исходные); *г* — GUR-4120 + PCB (исходные); *д* — GUR-2122 + PCB (отожженные); *е* — GUR-4120 + PCB (отожженные); *жс* — GUR-2122 + PCB (аппрат — KН550); *з* — GUR-4120 + PCB (аппарат — KН550); массовая доля PCB — 10 %

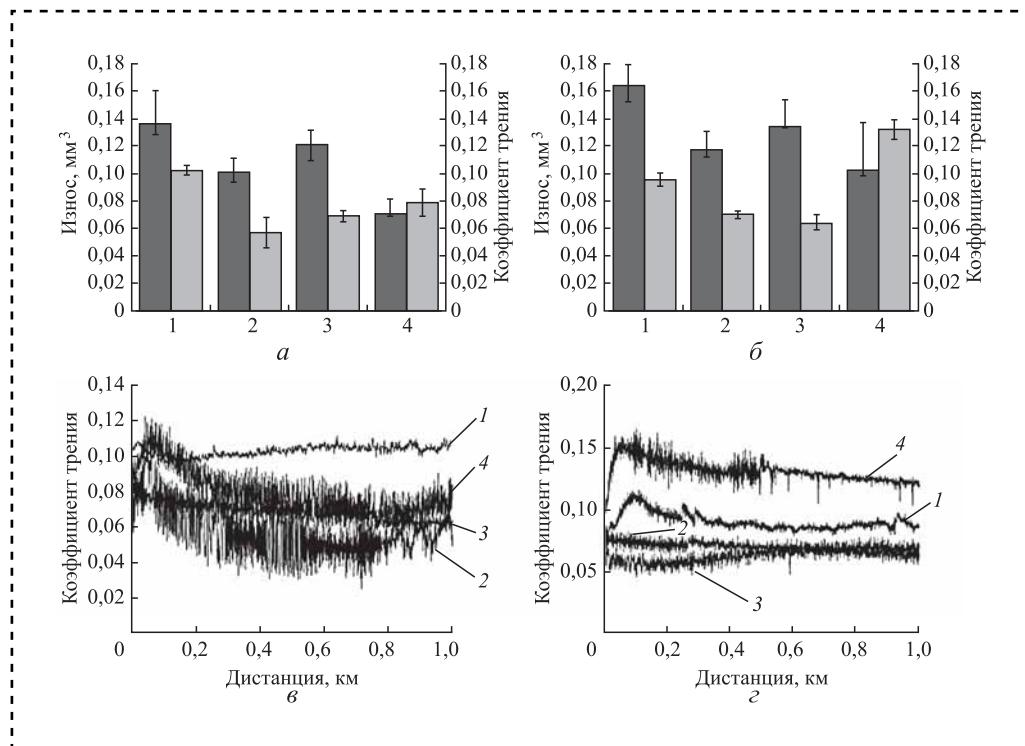
результаты исследований изнашивания композитов в различных условиях испытаний, а также измеренные температуры контртела.

В "мягких" условиях нагружения ( $P = 60$  Н,  $v = 0,3$  и  $0,5$  м/с) изнашивание композитов на различных полимерных матрицах (GUR-

2122 и GUR-4120) эквивалентны. Близки по величине и температуры контртела. В "жестких" же условиях испытаний ( $P = 140$  Н;  $v = 0,3$  и  $0,5$  м/с) в композитах на основе крупнодисперсного порошка GUR-4120 износ практически вдвое выше износа композитов на основе мелкодисперсного порошка GUR-2122. Температуры контртел при этом мало отличаются (см. табл. 3). Эта разница в изнашивании композитов связана с процессом переориентирования молекулярной структуры в поверхностном слое трибоконтакта в направлении скольжения контртела. Это может быть вызвано различной кристалличностью стеклонаполненных композитов на мелко- и крупнодисперсной порошковых матрицах СВМПЭ [11]. Помимо собственно молекулярной, сформированная надмолекулярная структура в композитах с различными исходными порошками (мелко-/крупнодисперсные) и распределение наполнителя (стекловолокон) в ней определяют в условиях трибоконтакта уровень упругого восстановления [12] и, как следствие, условия и длительность работы трибоузла. На рис. 6 и 7 эта разница в распределении наполнителя в композитах на основе мелко- и крупнодисперсного порошка СВМПЭ наглядно подтверждается.

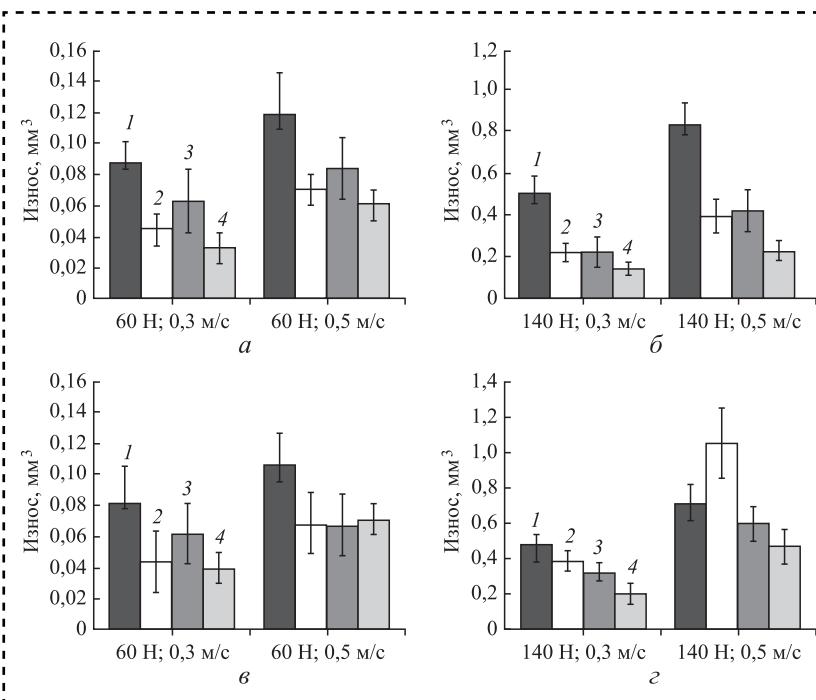
Наблюдаемые топографии поверхностей изнашивания полностью коррелируют с величинами износа при всех режимах трибонагружения (рис. 8, 9).

В более "мягких" условиях трибонагружения ( $P = 60$  Н,  $v = 0,3$  и  $0,5$  м/с) поверхно-



**Рис. 5. Диаграммы и кривые, характеризующие износ и коэффициент трения для GUR-2122 (*а*, *в*), GUR-4120 (*б*, *г*) и композитов:**

*1* — СВМПЭ; *2* — СВМПЭ + PCB; *3* — СВМПЭ + PCB (отожженный); *4* — СВМПЭ + PCB (аппрат — KH550); схема "шар-по-диску", режим 5 Н и 0,3 м/с; массовая доля PCB — 10 %



**Рис. 6. Диаграммы, характеризующие объемный износ GUR-2122 (*а*, *б*), GUR-4120 (*в*, *г*) и композитов:**

*1* — СВМПЭ; *2* — СВМПЭ + PCB; *3* — СВМПЭ + PCB (отожженный); *4* — СВМПЭ + PCB (аппарат — KH550); массовая доля PCB — 10 %

сти дорожек трения композитов на обеих матрицах достаточно гладкие, что соответствует однотипному характеру износа (см. табл. 3 и рис. 6). В этих условиях трибонагружения стекловолокна "защищают" матрицу от изнашивания.

В "жестких" условиях трибонагружения ( $P = 140$  Н,  $v = 0,3$  и  $0,5$  м/с) стекловолокна выполняют исключительно армирующую роль в композитах, поэтому изнашивание композита зависит от распределения стекловолокон в матрице (оно различное в композициях на основе мелко- и крупнодисперсного порошка СВМПЭ). По этой причине износостойкость стеклонаполненных композитов на основе мелкодисперсного порошка GUR-2122 выше, чем на основе крупнодисперсного GUR-4120.

Полученные результаты по влиянию размерности исходного порошка на трибологические и меха-



Таблица 3

## Износ композитов на основе СВМПЭ при сухом трении и температуры контролера ("вал—колодка")

Композит	Износ, $\text{мм}^3$	$T, ^\circ\text{C}$						
	60 Н и 0,3 м/с	60 Н и 0,5 м/с	140 Н и 0,3 м/с	140 Н и 0,5 м/с	60 Н и 0,3 м/с	60 Н и 0,5 м/с	140 Н и 0,3 м/с	140 Н и 0,5 м/с
GUR-2122	$0,087 \pm 0,01$	$26,5 \pm 2$	$0,118 \pm 0,027$	$34,9 \pm 2$	$0,503 \pm 0,08$	$37,6 \pm 2$	$0,832 \pm 0,1$	$61 \pm 2$
GUR-2122 + PCB	$0,045 \pm 0,01$	$29 \pm 2$	$0,070 \pm 0,01$	$30,3 \pm 2$	$0,221 \pm 0,04$	$38 \pm 2$	$0,394 \pm 0,08$	$44,2 \pm 2$
GUR-2122 + PCB (отожженный)	$0,063 \pm 0,02$	$29,3 \pm 2$	$0,084 \pm 0,02$	$33 \pm 2$	$0,222 \pm 0,07$	$38 \pm 2$	$0,420 \pm 0,1$	$48 \pm 2$
GUR-2122 + PCB (аппрат — KH550)	$0,033 \pm 0,01$	$27,7 \pm 2$	$0,061 \pm 0,01$	$34 \pm 2$	$0,141 \pm 0,003$	$37,5 \pm 2$	$0,223 \pm 0,05$	$45 \pm 2$
GUR-4120	$0,08 \pm 0,024$	$28 \pm 2$	$0,105 \pm 0,02$	$35,6 \pm 2$	$0,479 \pm 0,05$	$38,5 \pm 2$	$0,712 \pm 0,1$	$53 \pm 2$
GUR-4120 + PCB	$0,042 \pm 0,02$	$27 \pm 2$	$0,067 \pm 0,02$	$32 \pm 2$	$0,381 \pm 0,06$	$38,2 \pm 2$	$1,046 \pm 0,2$	$44 \pm 2$
GUR-4120 + PCB (отожженный)	$0,060 \pm 0,02$	$27,5 \pm 2$	$0,066 \pm 0,02$	$32,3 \pm 2$	$0,319 \pm 0,05$	$37,1 \pm 2$	$0,592 \pm 0,1$	$42,5 \pm 2$
GUR-4120 + PCB (аппарат — KH550)	$0,038 \pm 0,01$	$27,5 \pm 2$	$0,069 \pm 0,01$	$33 \pm 2$	$0,196 \pm 0,06$	$34,3 \pm 2$	$0,465 \pm 0,1$	$51,3 \pm 2$

Примечание. Массовая доля PCB — 10 %.

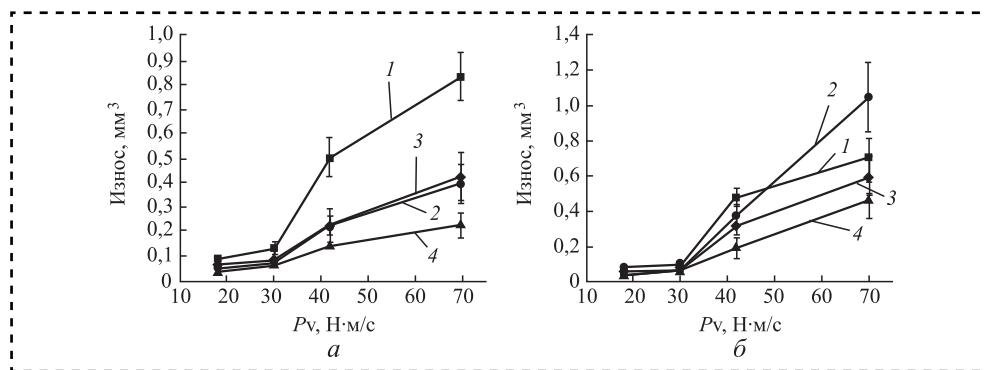


Рис. 7. Графики объемного износа GUR-2122 (а) и GUR-4120 (б) и композитов на их основе:

1 — СВМПЭ; 2 — СВМПЭ + PCB; 3 — СВМПЭ + PCB (отожженный); 4 — СВМПЭ + PCB (аппарат — KH550); массовая доля PCB — 10 %

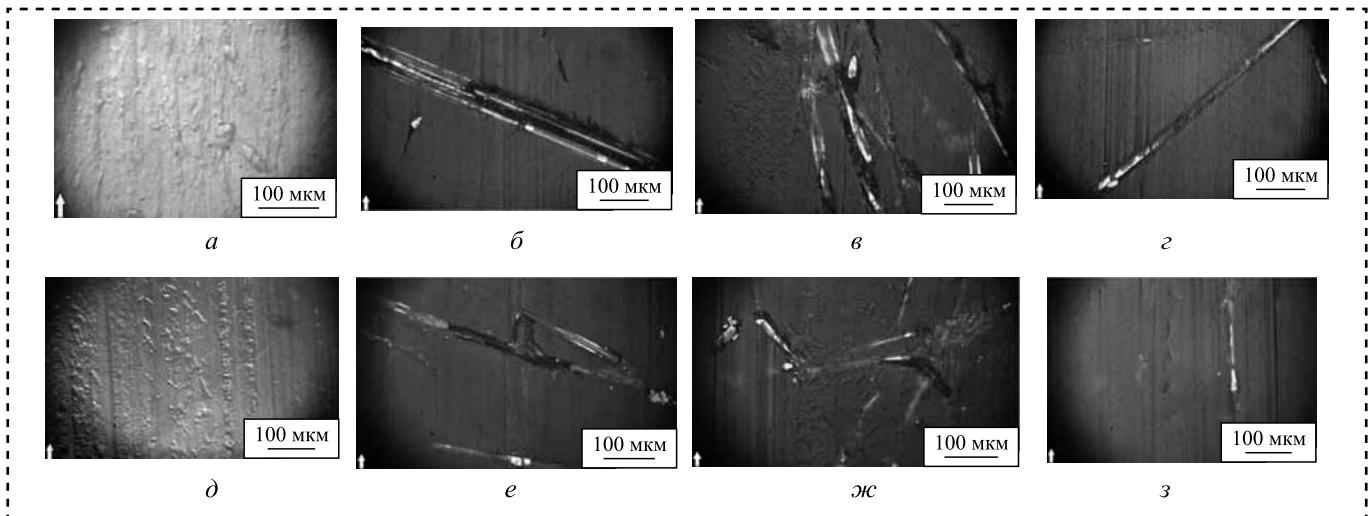


Рис. 8. Оптические фотографии ( $\times 400$ ), характеризующие топографию поверхностей изнашивания образцов СВМПЭ при  $P = 60$  Н,  $v = 0,3$  м/с:

а — GUR-2122; б — GUR-2122 + PCB; в — GUR-2122 + PCB (отожженный); г — GUR-2122 + PCB (аппарат — KH550); д — GUR-4120; е — GUR-4120 + PCB; ж — GUR-4120 + PCB (отожженный); з — GUR-4120 + PCB (аппарат — KH550); массовая доля PCB — 10 %

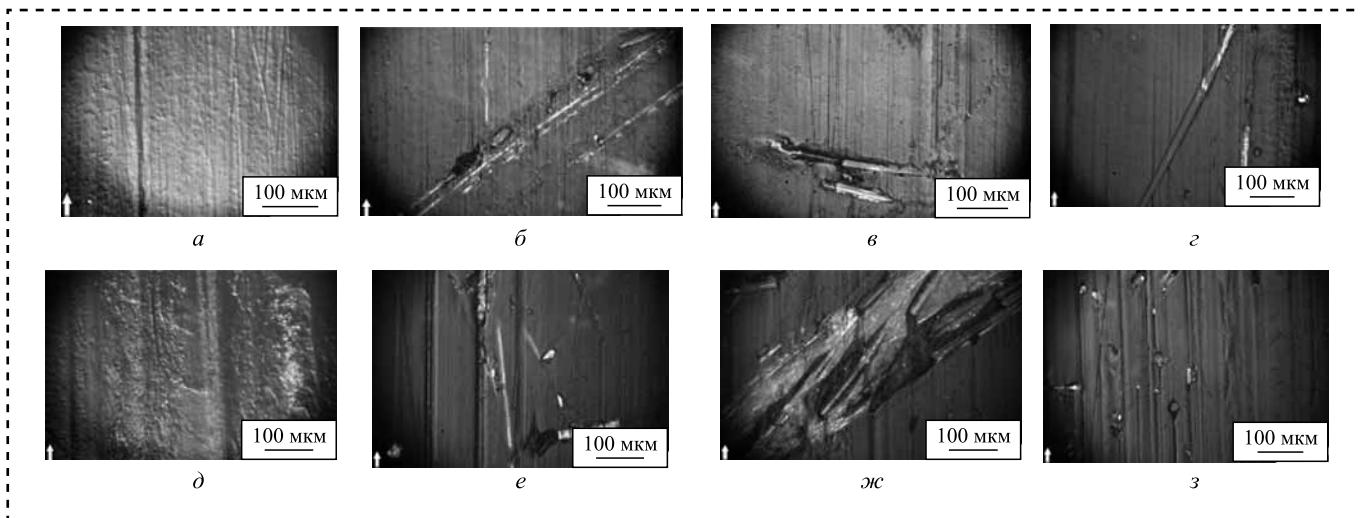


Рис. 9. Оптические фотографии ( $\times 400$ ), характеризующие топографию поверхностей изнашивания образцов СВМПЭ при  $P = 60$  Н,  $v = 0,3$  м/с:

*a* — GUR-2122; *б* — GUR-2122 + PCB; *в* — GUR-2122 + PCB (отожженный); *г* — GUR-2122 + PCB (аппрат — KH550); *д* — GUR-2122; *е* — GUR-4120 + PCB; *ж* — GUR-4120 + PCB (отожженный); *з* — GUR-4120 + PCB (аппарат — KH550); массовая доля PCB — 10 %

нические характеристики композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена со стекловолокном, функционализированным реагентом KH550, позволяют рекомендовать композит СВМПЭ2122 + PCB (массовая доля PCB — 10 %) для использования в узлах трения в широком интервале исследованных нагрузок и скоростей скольжения.

### Заключение

Исследованы трибологические и механические свойства композитов на основе матрицы сверхвысокомолекулярного полиэтилена GUR-2122 и GUR-4120 с рубленными стекловолокнами, функционализированными силансодержащим аппретом KH550 и отличающихся размером исходного порошка.

Показано, что исходный размер порошка в условиях равной молекулярной массы определяет характер распределения стекловолокон в матрице и, как следствие, механические и триботехнические свойства композитов.

Установлено, что стеклонаполненный композит на основе мелкодисперсного порошка GUR-2122 обладает более высокими трибомеханическими характеристиками по сравнению с крупнодисперсным GUR-4120.

Для антифрикционных приложений в широком интервале нагрузок и скоростей скольжения в трибоузлах рекомендовано применять композит GUR-2122 + PCB (массовая доля PCB — 10 %), в котором волокнистый наполнитель функционализирован аппретом KH550.

### Библиографический список

1. Briscoe B.J., Sinha S.K. Tribological applications of polymers and composites: Past, present and future prospects // Elsevier. 2008. P. 1–14.
2. Kurtz S. Biomaterials Handbook. 2016. P. 434–448.
3. Galetz M.C., Blar T., Ruckdaschel H., Sandler K.W., Alstadt V. Carbon Nanofibre-Reinforced Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene for Tribological Applications // Journal of Applied Polymer Science. 2007. 104. P. 4173–4181.
4. Chukov D.I., Stepashkin A.A., Gorshenkov M.V. et al. Surface modification of carbon fibers and its effect on the fiber–matrix interaction of UHMWPE based composites // Journal of Alloys & Compounds. 2014. 586. P. 459.
5. Дисперсионно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин и др. Новосибирск: Наука. 2017. 311 с.
6. Mimaroglu A., Unal H., Arda T. Friction and wear performance of pure and glass fibre reinforced polyether-imide on polymer and steel interface materials // Wear. 2007. 262 (11–12). P. 1407–1413.
7. Rowona C., Marcella R., Marco N. et al. Friction, lubrication, and polymer transfer between UHMWPE and CoCrMo hip-implant materials: A fluorescence microscopy study // Journal of Biomedical Materials Research. Part A. 2009. 89A (4). P. 1011–1018.
8. Механические и триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ со стекловолокном, функционализированным различными силансодержащими модификаторами. Часть 1 / С.В. Панин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. Т. 20. № 8.
9. Охлопкова Т.А., Охлопкова А.А., Спиридонов А.М., Никифоров Л.А. Структурные изменения сверхвысокомолекулярного полиэтилена под воздействием керамических нанодисперсий // Вопросы материаловедения. 2014. № 3 (79). С. 145–153.
10. Mc G Loughlin T.M., Kavanagh A.G. Wear of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMW-PE) in total knee prostheses: a review of key influences // Proc. Inst. Mech. Eng. 2000. H 214. P. 349–359.
11. Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O. et al. Comparison of mechanical and tribotechnical properties of UHMWPE reinforced with basalt fibers and particles // Materials Science and Engineering. 2016. V. 156. No. 1. P. 170–176.
12. Белошенко В.А., Варюхин В.Н., Возняк Ю.В. Эффект памяти формы в полимерах // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 3. С. 285–306.



УДК 621.891

**И.А. Меделяев, д-р техн. наук**

(Военная академия РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха Моск. обл.)

E-mail: medd\_ia@mail.ru

## Волновой характер деформации при трении скольжения

*Упругие и пластические волны напряжений, температурные волны рассмотрены как источник возникновения волновых процессов при трении скольжения.*

*Показано, что динамическая природа трения и вибрации технической системы обусловливают волновой характер деформации и колебания в узле трения.*

*Elastic and plastic stress waves, temperature waves are considered as a source of wave processes during sliding friction.*

*It is shown that the dynamic nature of friction and vibration of the technical system determine the wave character of deformation and vibration in the friction unit.*

**Ключевые слова:** волна, напряжение, температура, процесс, деформация, трение, смазывание, смазочный материал.

**Keywords:** wave, stress, temperature, process, deformation, friction, lubrication, lubricant.

В основе природы трения лежат колебательные и волновые движения, возникающие при относительном перемещении одной поверхности детали по другой. На поверхности трения возникают упругие волны различных частот и амплитуд [1–3].

Источниками их возникновения считаются упругие взаимодействия областей локального контакта [1–4], пластическая деформация и разрушение в областях взаимодействия микрошероховатостей [5, 6], образование и отделение частиц износа [7], изменяющихся во времени.

Непрерывный ряд упругих волн, перемещаясь от поверхности трения вглубь детали, преломляется и отражается от противоположной грани материала трения (рис. 1). Их действие приводит к сжатию и сдвигу материала в поверхностном слое и возникновению деформаций сжатия и сдвига (рис. 2).

При больших скоростях деформации и нагрузках, превышающих предел текучести, возникают и распространяются не только упругие, но и пластические волны напряжений [8].

Скорость распространения пластических волн напряжений значительно меньше скорости распространения упругих волн, а следова-

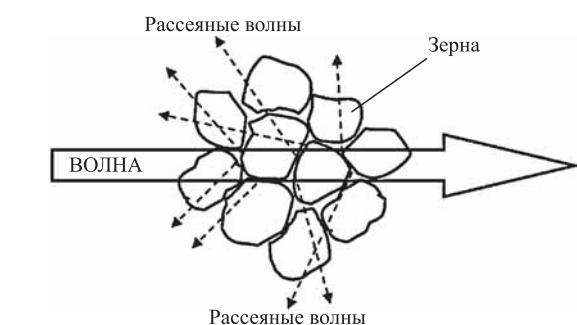


Рис. 1. Рассеяние упругих волн в реальном металле

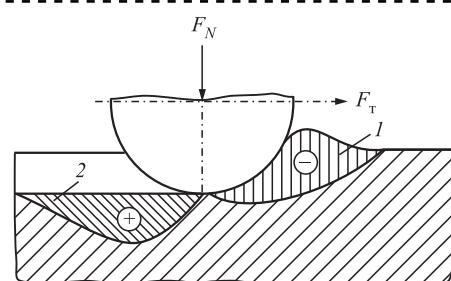


Рис. 2. Схема взаимодействия движущейся жесткой сферической неровности и идеально гладкой поверхности металла:

1 — зона сжимающих напряжений; 2 — зона растягивающих напряжений

тельно, отраженные упругие волны растяжения изменяют пластические волны, уменьшая амплитуду деформации.

Процессы упругопластической деформации при трении металлов локализуются в микрообъемах поверхностного слоя, примыкающих к пятнам касания, и обусловлены действием касательных напряжений в зоне фрикционного контакта [9–12]. При трении скольжения их высокий уровень достигается непосредственно на поверхности и с увеличением расстояния от поверхности трения напряжения снижаются приблизительно по степенному закону.

Быстро чередующиеся деформации сжатия и сдвига, результатом которых являются упругие и пластические волны напряжений, сказываются на изменении коэффициента трения, температуры поверхности трения и толщине смазочного слоя (рис. 3).

Коэффициент трения — не всегда постоянная величина даже при установившемся режиме процесса, а изменяется, достигая максимумов и минимумов, и указывает на динамическую природу трения [1]. Ее проявление — это возникновение акустических сигналов, источником которых являются упругие волны, несущие информацию о процессах деформации, разрушения и адгезионного схватывания в зоне контактного взаимодействия [9–13].

Периодически изменяющийся коэффициент трения обуславливает амплитудную модуляцию упругих волн, вызванную флюктуацией мгновенного значения коэффициента трения вследствие изменения микрорельефа поверхности трения [14].

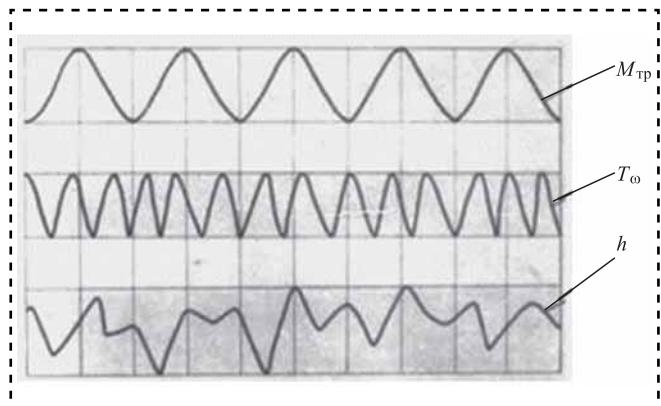


Рис. 3. Характер изменения момента трения  $M_{тр}$ , температуры поверхности трения  $T_\omega$  и толщины  $h$  смазочного слоя в процессе работы пары трения при смешанном смазывании [1]

Существует несколько подходов к объяснению причин возникновения колебаний в системе трения. Все они связывают возникновение и развитие колебаний с изменением коэффициента трения в процессе фрикционного взаимодействия [1–3], но объяснения их различны:

— возникновение колебаний обусловлено падающей нелинейной зависимостью коэффициента трения от скорости скольжения [15];

— колебания развиваются вследствие положительной разности между силой трения покоя и силой трения скольжения при силе трения, независимой от скорости скольжения [16];

— колебания развиваются вследствие положительной разности между силой трения покоя и силой трения скольжения при силе трения, зависимой от скорости скольжения [17];

— в возникновении фрикционных колебаний играют роль реологические явления на контакте [18];

— возникновение фрикционных колебаний связывается с изменением характеристик трения за счет тепловых процессов [19].

Однако наибольшее распространение получили теории, объясняющие природу фрикционных автоколебаний различием в значении коэффициента трения при покое и движении, а также падением коэффициента трения с возрастанием скорости скольжения. Последнее обстоятельство объясняет наличие критической скорости скольжения, выше которой колебания не наблюдаются и коэффициент трения начинает снова возрастать. Если же увеличения коэффициента трения со скоростью не наблюдается, то считают, что и фрикционные автоколебания не исчезают — они лишь становятся малозаметными благодаря очень высокой частоте и малой амплитуде.

Рассмотрим зависимости коэффициента трения от скорости при значительных скоростях скольжения. Следует различать два случая — сухое трение и трение со смазочным материалом (СМ). Первый случай имеет техническое применение в различного рода тормозных и зажимных устройствах, второй — в кинематических парах механизмов и машин, нормально работающих с СМ, введенным для уменьшения трения и износа.

При сухом трении имеет место снижение коэффициента трения с ростом скорости. Согласно классической теории [15, 16], дина-



мический коэффициент трения пропорционален реальной площади контактной поверхности между телами. Площадь контакта определяется шероховатостью соприкасающихся поверхностей и, следовательно, зависит от времени вследствие деформации неровностей из-за ползучести под действием нормальной нагрузки.

Длительность контакта при скольжении можно оценить как

$$t = L/v,$$

где  $L$  — среднее расстояние между шероховатостями;

$v$  — скорость скольжения.

При высоких скоростях ползучесть не успевает происходить. При малых скоростях площадь контакта максимальна. В обоих случаях скоростная зависимость трения связана с увеличением касательной силы, необходимой для сдвиговой деформации или разрушения неровности. В промежуточной области скоростей, когда длительность контакта и характерное время скольжения сопоставимы, чем выше скорость, тем меньше площадь контакта и, следовательно, коэффициент трения: зависимость коэффициента трения становится  $N$ -образной. В типичных моделях сухого трения предполагается, что коэффициент трения монотонно уменьшается с ростом скорости [16]. В этом случае в системе отсутствует характерный масштаб, и модели предсказывают степенные корреляции протекающих в ней процессов.

Совсем другая зависимость от скорости скольжения имеется для силы трения и коэффициента трения при трении с СМ (рис. 4). При наличии СМ даже первоначальное значение коэффициента трения покоя в несколько раз меньше, чем значение коэффициента трения покоя для сухого трения. Переход от трения покоя (сцепления) к трению скольжения почти незаметен.

По мере роста скорости наблюдается интенсивное падение коэффициента трения скольжения, а затем при некоторой скорости

коэффициент трения (а вместе с тем и сила трения) достигает минимального значения, после чего наблюдается медленное возрастание коэффициента трения с увеличением скорости.

Падение коэффициента трения с увеличением скорости объясняется изменением режима смазывания, т.е. увеличением количества СМ, поступающего на поверхности соприкосновения деталей, так как в большинстве случаев действие устройств для подачи СМ основано на использовании скорости движения детали (например, кольцевая смазка подшипников, смазка разбрызгиванием шеек коленчатых валов двигателей и т.п.). По мере увеличения подачи СМ смазочный слой  $h$  между поверхностями трения постепенно увеличивается и при некоторых определенных для каждого случая условиях достигает максимального значения, чему соответствует настолько значительный слой СМ, что элементарные неровности скользящих деталей перестают задевать друг друга.

Повышение коэффициента трения при дальнейшем росте скорости объясняется гидромеханическими явлениями. Частицы СМ, непосредственно прилегающие к по-

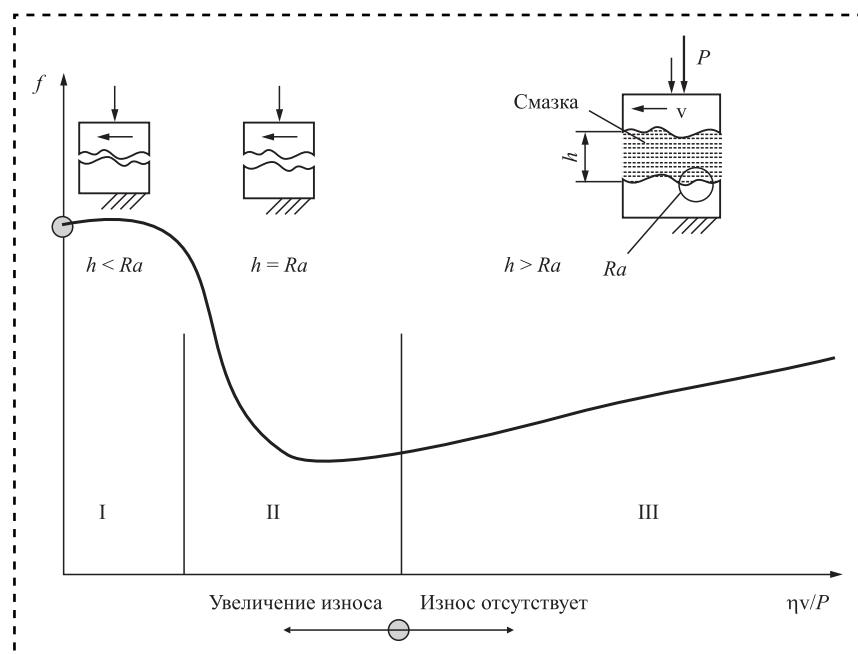


Рис. 4. Диаграмма Герси—Штрибека, связывающая коэффициент трения  $f$  с параметрами процесса смазывания (вязкостью  $\eta$ , скоростью  $v$ , нагрузкой  $P$ ):

I — граничное смазывание, II — смешанное смазывание, III — гидродинамическое смазывание;  $h$  — толщина смазочного слоя;  $Ra$  — параметр шероховатости поверхности



верхности движущейся детали, увлекаются со скоростью этой детали, а прилегающие к неподвижной поверхности, задерживаются ею. Промежуточные слои движутся каждый со своей скоростью, постепенно уменьшающейся от точки к точке. Отдельные элементарные слои в смазочном слое будут скользить друг по другу, а жидкостные элементы смазки будут подвергаться деформации сдвига — перекосу. Благодаря тому, что смазочный слой обладает вязкостью, деформация сдвига жидкостных элементов потребует затраты некоторой силы, возрастающей по законам гидродинамических сопротивлений со скоростью деформации, а вместе с тем и со скоростью скольжения.

Из зависимости Герси—Штрибека (см. рис. 4), которая связывает коэффициент трения с параметрами процесса смазывания (вязкостью, скоростью, нагрузкой), следует, что при смешанном смазывании (и гидродинамическое, и граничное смазывание, см. рис. 4, зона II) расстояние между сопрягаемыми поверхностями соизмеримо с параметрами их шероховатости.

При граничном смазывании (см. рис. 4, зона I) сопрягаемые поверхности контактируют на некотором участке. Толщина слоя СМ значительно меньше параметров шероховатости поверхностей. Процесс трения обусловлен свойствами СМ, которые отличаются от свойств материала в большом объеме (далее объемные свойства). Изнашивание поверхностей определяется физико-химическими взаимодействиями в " пятнах" фактического контакта поверхностей, параметрами поверхностей и свойствами граничных слоев СМ. В результате физико-химических процессов на поверхностях трения образуются граничные слои, которые исключают непосредственный контакт неровностей. Они отличаются низкой прочностью на сдвиг и большим сопротивлением сжатию. Тонкая граничная пленка смазочного материала на сопрягаемых поверхностях повторяет их рельеф, контакт поверхностей происходит через СМ по отдельным участкам. Малая толщина смазочного слоя не может препятствовать упругой и пластической деформациям контактирующих тел, при этом сдвиг происходит в пленке, а не в основном материале. При значительной пластической деформации и высокой температуре смазочная пленка может разрушиться, тогда адгезия, трение и изнашивание увеличиваются.

При граничном смазывании процесс трения обусловливают триады И.В. Крагельского и А.В. Чичинадзе, эффект П.А. Ребиндера. С учетом различий свойств поверхности твердого тела и граничного слоя СМ процесс трения определяется взаимодействием смазочного слоя с твердым телом и молекулярно-механическими свойствами этого слоя.

При гидродинамическом смазывании (см. рис. 4, зона III) сопрягаемые поверхности полностью разделены слоем СМ. Толщина  $h$  слоя значительно больше параметра  $Ra$  шероховатости поверхности. Трение определяется вязкостными свойствами СМ; изнашивание поверхностей отсутствует.

При смешанном смазывании процесс трения неустойчив и при повышении нагрузки переходит в трение с граничным смазыванием. Поэтому целесообразно рассматривать работу узлов трения при смешанном смазывании двух типов: 1) трение при гидродинамическом и граничном смазывании; 2) трение при граничном смазывании и без СМ (сухое трение).

Разделение процесса смешанного смазывания на два вида позволяет описать работу узлов трения, соответствующую на графике Герси—Штрибека зоне, находящейся слева от минимума. В этом случае граничное смазывание — основной вид трения.

В процессе эксплуатации поверхностные слои узлов трения и СМ испытывают динамические воздействия, приводящие к упруго-пластическим деформациям, выделению теплоты, нарушению динамического равновесия процессов разрушения и восстановления смазочной пленки на поверхностях трения, к повреждению поверхностей пары трения [1–3].

При относительном движении поверхностей контакта механическая энергия упругих деформаций вследствие внутреннего трения преобразуется в колебательное и беспорядочное тепловое движение в субмикроскопических и микроскопических частицах поверхностного слоя металлического тела (рис. 5). Теплота распространяется в поверхностном слое пары трения от пятен контакта в глубь контактирующих тел в виде температурных волн, при этом амплитуда и частота колебания температурных волн могут принимать различные значения (рис. 6). С увеличением глубины амплитуда температурных волн уменьшается [20, 21].



**Рис. 5. Схема преобразования энергии упругой деформации в паре трения со смазочным материалом**

Поглощение тепловой энергии СМ приводит к снижению вязкости и уменьшению трения между слоями СМ.

Возникающие в микрообъемах поверхностного слоя металлического тела температурные импульсы создают в системе трения две температурные области [1–3, 21]:

— область микрообъемов поверхностного слоя (скользящий контакт), в которой происходит возникновение и распространение температурных волн определенной амплитуды и

частоты, а следовательно, при всех режимах трения возникают колебания температур, перемещение волн напряжений и поглощение температурных волн;

— область микрообъемов глубинного слоя, в которой температура стремится к нулю и при стационарном режиме она по времени постоянна.

Глубина проникновения температурных волн зависит от скорости скольжения и качества обработки поверхностей контакта [1, 21]:

— с увеличением скорости скольжения температурные волны распространяются на меньшую глубину;

— при возрастании шага неровностей на трущейся поверхности (при грубой обработке поверхности) глубина распространения температурных волн в поверхностном слое увеличивается;

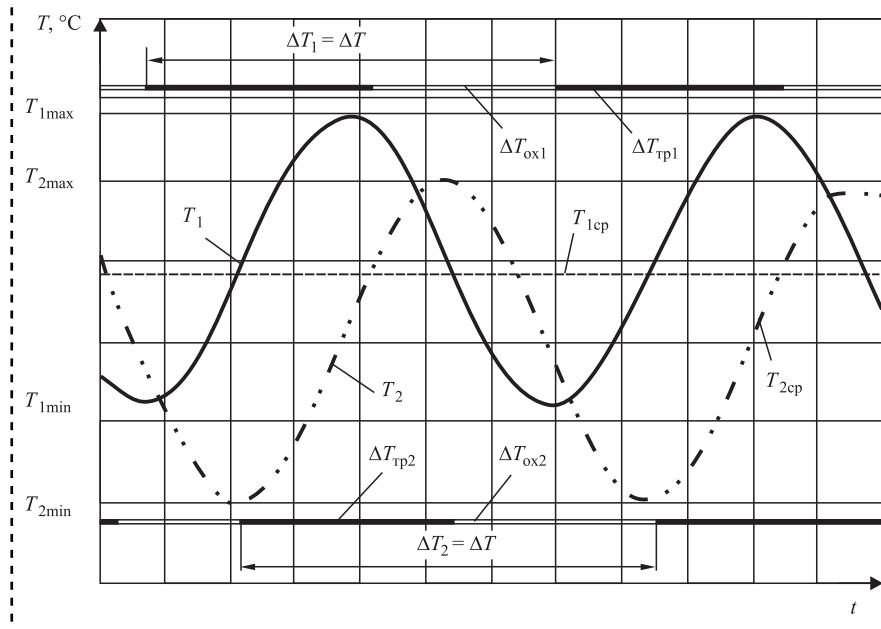
— при уменьшении шага неровностей (улучшении чистоты обработки поверхности) глубина проникновения температурных волн уменьшается;

— при высоком качестве обработки поверхности соотношение между глубиной проникновения температурной волны и шагом неровностей увеличивается.

Динамический характер процесса трения проявляется не только в макро-, но и в микроскопическом масштабе (рис. 7).

В начальный момент времени под действием силы трения поверхность трения деформируется упруго, дальнейшее скольжение приводит к фрикционному тепловыделению в зоне контакта и его влиянию на СМ и материалы трения (сталь, бронзу). Возникает градиент температуры, который из-за различия физико-механических свойств поверхностных слоев и изменения смазочного зазора в паре трения обуславливает квазипериодические колебания в узле трения.

На поверхности трения и в приповерхностном слое имеют место колебания температуры (см. рис. 3, 6). Изменение тепло-



**Рис. 6. Схема изменения температуры во времени:**

$T_{1\min}$  и  $T_{1\max}$  — минимальная и максимальная температуры поверхности трения тела 1;  $T_{2\min}$  и  $T_{2\max}$  — минимальная и максимальная температуры поверхности трения тела 2;  $T_{1cp}$  и  $T_{2cp}$  — средние температуры поверхностей трения тел 1 и 2;  $\Delta T_{tp1}$  и  $\Delta T_{tp2}$  — изменения температур на контурных площадках поверхностей трения тел 1 и 2;  $\Delta T_{ox1}$  и  $\Delta T_{ox2}$  — изменения температур поверхности трения тел 1 и 2 в зоне охлаждения;  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  — изменения температур поверхностей трения тел 1 и 2 [1]

вого режима в зоне контакта приводит к изменению структуры, физико-механических свойств трибосистемы, геометрии контакта.

Повышение температуры приповерхностных слоев до некоторой предельной величины, когда касательные напряжения, обусловленные трением, достигают предела текучести материала трения, вызывает срыв смазочной пленки, пластический сдвиг поверхностных слоев в пятнах касания вследствие снижения упругих свойств (рис. 8) и адгезионное разрушение — перенос и "намазывание" бронзы на сталь (рис. 7, 9).

Другое проявление повышения температуры приповерхностных слоев — нелинейная зависимость предела текучести от глубины: минимальное отношение текущего значения максимальной упругой деформации к ее начальному значению при удалении от поверхности определяется упругопластическими свойствами материала и предельной температурой, выше которой сила трения вызывает пластическую деформацию в поверхностных слоях [5, 22].

Пластический сдвиг в поверхностном слое приводит к возникновению волнового пластического течения и указывает на волновой ха-

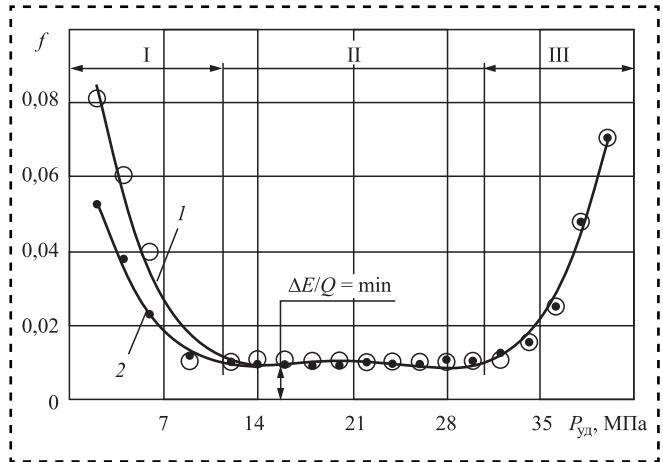


Рис. 7. Изменение коэффициента  $f$  трения в зависимости от удельной нагрузки  $P_{\text{уд}}$  при  $T_f = 20$  (1) и  $100$   $^\circ\text{C}$  (2), скорость скольжения  $v = \text{const}$ :

$T_f$  — температура смазочного материала на входе в узел трения; I — область неустойчивых процессов (область пуска и приработки, формирования тепловой флюктуации в объеме трения); II — область нормального трения (область совместимости и упругой деформации); III — область повреждаемости при высоких температурах ("срыв" смазочной пленки, износ и схватывание, проявление пластической деформации);  $\Delta E$  — изменение внутренней энергии, складывающейся из энергии, идущей на изменение структуры материала  $\Delta E_e$ , и энергии нагрева  $\Delta E_v$  ( $\Delta E = \Delta E_e + \Delta E_v$ );  $Q$  — энергия теплоперемены со средой [1]

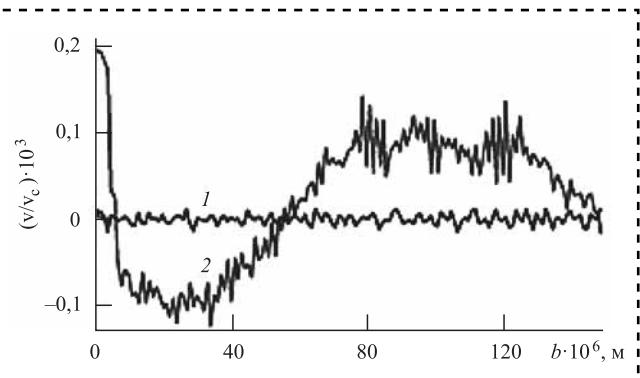


Рис. 8. Отношение скоростей смещения слоев образца  $v$  к скорости контртела  $v_c$  ( $b$  — расстояние до поверхности трения):

1 — при упругой деформации до начала пластического деформирования; 2 — волновой характер пластической деформации при величине пластической деформации на поверхности 0,06 % [5]

рактер пластической деформации при трении скольжения.

Возникающая картина может рассматриваться как специфический волновой процесс, связанный с пластической деформацией при растяжении образца. В ходе непрерывного растяжения образца с постоянной скоростью последовательно возникают несколько типов волновых процессов, сменяющих друг друга, причем в образце наблюдается согласованное движение системы очагов локализации пластической деформации вдоль оси растяжения (рис. 10).

Смена макроскопических картин локализации пластического течения может рассматриваться

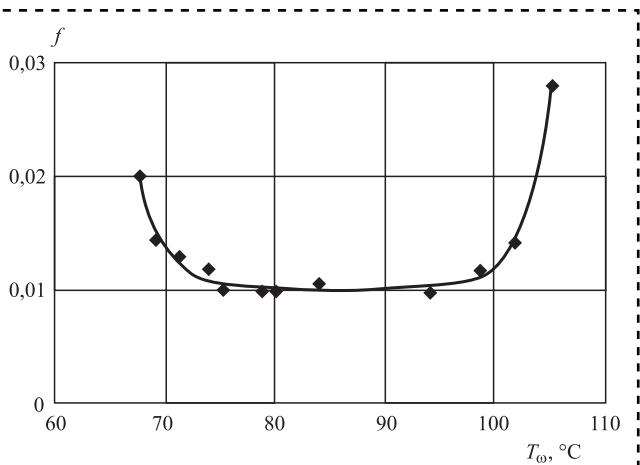
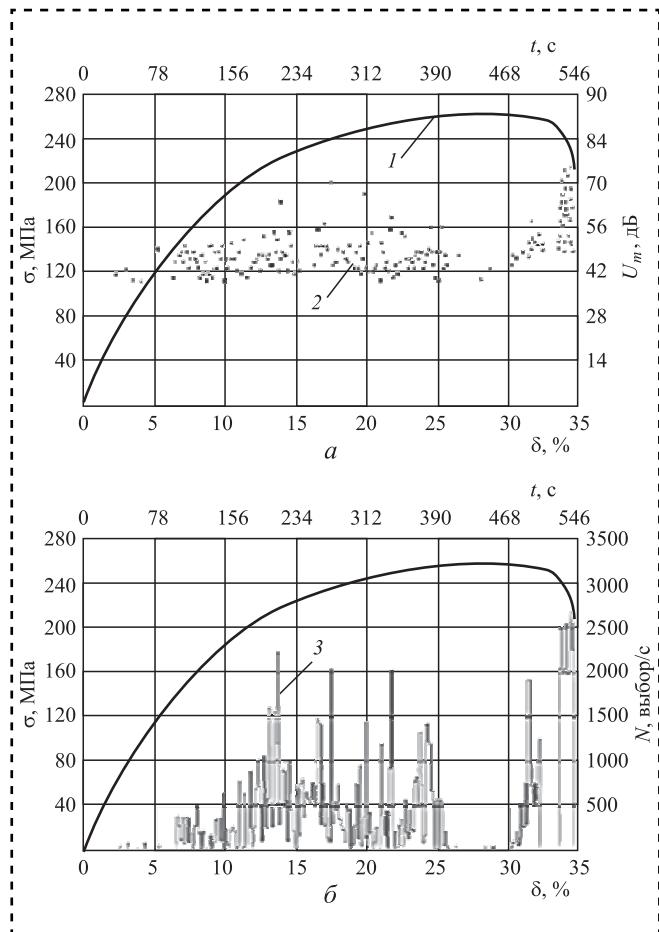


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения от температуры поверхности трения для пары трения Х12Ф1 — БрОСН10-2-3:

коэффициент взаимного перекрытия  $K_{\text{вз}} = 0,8$ ; торцевое бение  $\delta = 60$  мкм; температура смазочного материала на входе в узел трения  $T_f = 125$   $^\circ\text{C}$  [1]



**Рис. 10. Характерная зависимость изменения средней амплитуды (а) и скорости счета акустической эмиссии (б) при растяжении образца из меди (показано изменение плотности подвижных дислокаций):**

1 — график напряжение — деформация; 2 — сигналы акустической эмиссии; 3 — скорость счета акустической эмиссии

как специфический волновой процесс, связанный с пластической деформацией при растяжении образца и перестройкой автоволновых картин. В основе такой перестройки лежат процессы, протекающие на более мелкомасштабных уровнях системы, например, при скачкообразном изменении плотности дислокаций в ходе деформации [1, 5, 22, 23].

Локализация пластической деформации в тончайших поверхностных слоях, высокая плотность энергии, генерируемая в них, высокая физико-химическая структура и химическая активность поверхностного слоя определяют особенности пластической деформации поверхностных слоев при трении:

- движение дислокаций облегчает наличие большого числа несовершенств;
- взаимодействие дислокаций при дальнейшей деформации приводит к самотормо-

жению дислокаций и препятствует выходу полос скольжения на поверхность, повышая напряжение волнового пластического течения;

— распределение энергетической характеристики — работы выхода электрона — по поверхности вдоль оси нагружения имеет волнообразный характер и коррелирует с изменением дислокационных структур при пластической деформации [1, 24];

— общим свойством пластического течения твердых тел является его локализация на всех стадиях деформации, причем тип распределения очагов локализации зависит от степени деформации [24, 25];

— основные характеристики волнового процесса пластического течения: длина волны  $\lambda = 3 \dots 8$  мм и скорость распространения волны вдоль образца  $v_b = 10^{-5} \dots 10^{-4}$  м/с [26].

На процесс трения (особенно сухого или трения при смешанном смазывании) оказывают заметное влияние относительные колебания трущихся тел, вызываемые какой-либо внешней причиной. Такие колебания или возникают во время работы машины (вибрация двигателя, фрикционные автоколебания в соседнем узле трения и т.д.), или намеренно прикладываются к телу с определенной целью. Они могут действовать в одном, двух или одновременно в трех направлениях (в направлении скольжения, т.е. продольные; в направлении нормали к со-прикасающимся поверхностям; поперечные).

Относительные продольные колебания, амплитуда которых в отдельные моменты пре-восходит величину предварительного смещения, используются в различных вибротранспортирующих устройствах.

Микроколебания в пределах предварительного смещения равнозначны действию дополнительного переменного усилия, складывающегося с другими, действующими на тело силами.

Микроколебания в пределах предварительного смещения в той или иной мере, в зависимости от их амплитуды, частоты и направления, изменяют характеристики трения [27].

В процессе преобразования подводимой в зону трения механической энергии часть ее превращается в энергию колебательного процесса и отводится от зоны трения в виде спектра упругих волн колебаний. Данные колебательные процессы — результат колебаний собственно силы трения, связанный с ее формированием, закономерностями взаимодей-



ствия поверхностных слоев, разрушением тонких поверхностных, смазочных, пленок и т.д. Другой вид колебаний — это вибрации технической системы, включая и узел трения, вызванные силовым возбуждением процесса трения в механической системе привода машины. Этот вид колебаний определяется динамическими характеристиками всей технической системы в целом, включая и физико-механические процессы зоны трения. Трение сопровождается динамическими процессами в зоне трения и в самой механической системе привода машины. Эти процессы взаимосвязаны, в некоторых случаях значительны по величине и участвуют в синергетических процессах зоны трения [1–3, 9–13, 21, 28].

Таким образом, волновой процесс в зоне трения как часть динамической системы привода машины взаимосвязан с динамическим процессом в приводе, отражает особенности реализации механизма трения скольжения и может быть использован для настройки режимов взаимодействия материалов в паре трения [1–3, 29, 30].

### Библиографический список

1. Меделяев И.А., Албагачиев А.Ю. Трение и износ деталей машин. М.: Машиностроение, 2008. 462 с.
2. Приходько В.М., Меделяев И.А., Фатюхин Д.С. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами. М.: МАДИ, 2015. 264 с.
3. Меделяев И.А., Волобуев А.В., Безовский А.В. Обеспечение работоспособности деталей машин. М.: Авторская мастерская, 2017. 158 с.
4. Бородич Ф.М., Крюкова И.В. Фрикционные колебания, обусловленные деформированием шероховатостей контактирующих поверхностей // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 6. С. 67–73.
5. Рубцов В.Е., Колубаев А.В. Пластическая деформация и квазипериодические колебания в трибологической системе // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 11. С. 63–69.
6. Chen G.X., Zhou Z.R., Kapsa Ph., Vincent L. Effect of surface topography on formation of squeal under reciprocating sliding // Wear. 2002. V. 253. No. 3–4. P. 411–423.
7. Jibiki T., Shima M., Akita H., Tamura M. A basic study of friction noise caused by fretting // Wear. 2001. V. 251. No. 1–12. P. 1492–1503.
8. Кольский Г. Волны напряжений в твердых телах. М.: Иностранная литература, 1955. 194 с.
9. Меделяев И.А. Процессы в зоне контакта трибологических систем // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 2. С. 64–73.
10. Меделяев И.А. Энергетика изнашивания деталей машин при смешанном смазывании // Вестник машиностроения. 2018. № 8. С. 42–48.
11. Меделяев И.А. Причины деформаций и изнашивания в трибосопряжениях машин и механизмов их пути их снижения // Вестник машиностроения. 2018. № 8. С. 48–52.
12. Меделяев И.А. Физика абразивного изнашивания узлов трения технических систем // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 8. С. 367–375.
13. Колубаев Е.А. Деформирование поверхностных слоев при трении и факторы, влияющие на трибологические свойства металлов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Томск: ИФПМ СО РАН, 2005. 139 с.
14. Смолин А.Ю., Добринин С.А., Псахье С.Г. Анализ упругих волн, генерируемых при контактном взаимодействии. Компьютерное моделирование // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 3. С. 81–90.
15. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Наука и техника, 1995. 778 с.
16. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
17. Дерягин Б.В., Пуш В.Э., Толстой Д.М. Теория фрикционных автоколебаний при сухом трении. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 143 с.
18. Костерин Ю.Н. Механические автоколебания при сухом трении. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 220 с.
19. Амосов А.П. Контактно-гидродинамическая теория смазки и ее практическое применение в технике. Вып. 2. Куйбышев: КуАИ, 1978. С. 100–106.
20. Физические эффекты в машиностроении: справочник / В.А. Лукьянцев и др.; под общ. ред. В.А. Лукьянцева. М.: Машиностроение, 1993. 224 с.
21. Дубинин А.Д. Энергетика трения и износа деталей машин. М.-К.: Машгиз, 1963. 137 с.
22. Рубцов В.Е. Моделирование деформационных и тепловых процессов в поверхностном слое упруго-пластичного материала при трении: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Томск: ИФПМ СО РАН, 2004. 20 с.
23. Козлов Э.В., Старченко В.А., Конева Н.А. Эволюция дислокационной субструктурой и термодинамика пластической деформации металлических материалов // Металлы. 1993. № 5. С. 152–161.
24. Пантелеев К.В., Свистун А.И., Жарин А.Л. Диагностика локальных изменений пластической деформации по работе выхода электрона // Приборы и методы измерений. 2015. № 1 (10). С 61–63.
25. Митрофанов А.П., Паршева К.А. Анализ состояния поверхностных слоев металлов при различных условиях механического воздействия // Молодой ученик. 2016. № 11 (115). С. 433–436.
26. Зуев Л.Б., Баарникова С.А. О волновом характере макроскопической локализации пластической деформации металлов // Вестник ПермГТУ. Механика. 2011. № 2. С. 42–63.
27. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов (ред.) и др. / Детали машин. Конструкционная прочность. Трение и смазка. Т. IV—I / Д.Н. Решетов, А.П. Гусенков, Ю.Н. Дроздов и др.; под общ. ред. Д.Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1995. 864 с.
28. Локтева Н.А. Исследование колебательных явлений, возникающих в процессе воздействия на материалы вращающимся диском: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. Томск: ТПУ, 2002. 25 с.
29. Меделяев И.А. Научное обоснование технических решений по управлению изнашиванием в условиях граничного трения // Вестник машиностроения. 2008. № 11. С. 37–42.
30. Меделяев И.А. Управление работоспособностью узлов трения транспортной техники // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 6. С. 28–41.



УДК 621.735.016.2

**М.Ш. Мигранов, д-р техн. наук, А.М. Мигранов**

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

E-mail: migmars@mail.ru

## Геометрическая адаптация режущего клина для повышения износостойкости инструмента

*Приведены результаты исследования повышения износостойкости инструмента путем геометрической адаптации формы режущего клина при обработке резанием и фрезерованием различных по обрабатываемости материалов. Подтверждена возможность повышения износостойкости режущего инструмента на 75...90 % при обеспечении и улучшении показателей качества обработанного поверхностного слоя.*

*Results of research of increase of wear resistance of the tool by geometrical adaptation of the form of the cutting wedge at machining by cutting and milling of various materials on machinability are given. The possibility of increasing the wear resistance of the cutting tool by 75...90 % while ensuring and improving the quality of the treated surface layer is confirmed.*

**Ключевые слова:** трение, износ, режущий клин, геометрическая адаптация, самоорганизация, точение, фрезерование.

**Keywords:** friction, wear, cutting wedge, geometric adaptation, self-organization, turning, milling.

Традиционная борьба с потерями на трение и износом режущего инструмента при лезвийной обработке с помощью разработки и внедрения новых марок СОТС и покрытий приводит лишь к сохранению исходной формы режущего клина. Вместе с тем образование нароста на резце при умеренных скоростях резания, переход преимущественного износа по задней поверхности на переднюю с образованием лунки и т.д. подтверждает самоорганизацию процесса при резании. Таким образом, в этих случаях в самой системе формируется рациональный с точки зрения энергетических затрат, режущий клин, дополняющий инструмент [1–6]. Форма режущего клина зависит от скорости и условий резания (применение СОТС, покрытий и т.д.) и, как следствие, оказывает существенное влияние на температурно-силовые условия и контактные явления в зоне резания. Эта закономерность образования устойчивых естественных геометрических форм при трении и износе породила направление повышения износостойкости инструмента за счет геометрической адаптации режущего клина. Работа в этом направлении:

— актуальна для режущих инструментов, работающих в условиях существенной неста-

ционарности процесса резания (нестационарное точение — переменность подачи и глубины резания, фрезерование, сверление и т.п.), для операций черновой обработки, при использовании износостойких покрытий (отслоение, выкрашивание покрытия и т.п.) и т.д.;

— мало изучена, сложна и многовариантна как в теоретическом (энергетические закономерности, механика резания и т.д.), так и экспериментальном плане ввиду микроскопичности форм и переменности контактных процессов (микрорезание, условия стружкообразования и т.д.);

— востребована для лезвийной обработки крупногабаритных деталей силовой части газотурбинных двигателей (ГТД), где в процессе резания в пределах одного длительного получистового и чистового проходов нельзя менять режущий инструмент, чтобы не снизить показатели качества обработанного поверхностного слоя.

Исследования влияния элементов режима резания (скорости, подачи и глубины резания) на основные параметры процесса резания — температуру и силу резания, износостойкость режущего инструмента, коэффициент усадки стружки при использовании различных

инструментальных материалов проводили по стандартным методикам: стойкостные и температурные испытания — на универсальном токарном станке нормальной жесткости И6К20Т, оборудованном тиристорным преобразователем для бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя и вертикально-фрезерном станке НЕКСЕРТ.

Для экспериментальных исследований, как при точении, так и при фрезеровании, использовали заготовки из одной партии материалов, одинаковых марок: при точении диаметром 70...120 мм и длиной 300...400 мм, предварительно обточенные и зацентрованные с обеих сторон. В качестве обрабатываемых материалов использовали стали и сплавы различных групп обрабатываемости резанием: 40Х; 14Х17Н2; 12Х18Н10Т; 07Х16Н6; 15Х18Н12С4ТЮ; ХН73МБТЮ.

Для исследований обрабатываемости материалов при натурных испытаниях применяли цельные резцы, сверла и фрезы. Цилиндрическое фрезерование проводили концевыми фрезами как из быстрорежущей стали, так и из твердосплавного материала ( $d = 12, 13$  мм;  $z = 4, 5$ ), а торцевое фрезерование — однорезцовыми фрезами ( $d = 90$  мм), оснащенными четырехгранными пластинами. Марки инструментальных материалов из быстрорежущей стали: Р6М5, Р6М5К5, Р9К5, группы ВК: ВК8, ВК6М, ВК100М, ТК: Т15К6 и ТТК: ТТ8К6 назначали в соответствии с рекомендациями [1, 2]. Указанные марки твердых сплавов — лучшие по износостойкости и производительности обработки в зоне оптимальных и близких к экономическим скоростям резания (для условий чистового и получистового точения) [2]. Цельные резцы и твердосплавные пластины имели геометрию режущей части:  $\gamma = 0$ ;  $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$ ;  $\phi = \phi_1 = 45^\circ$ ;  $\lambda = 0$ ;  $R = 0,5$  мм.

Большинство экспериментальных данных по износу и стойкости режущих инструментов получены путем непосредственного наблюдения и измерения зон износа на резце и фрезе. В условиях чистового и получистового резания определяющим элементом износа инструмента является фаска износа по его задней поверхности [1, 2, 5]. Наименьшей изменчивостью результатов измерения износа характеризуется средний износ задней поверхности вдоль глав-

ной режущей кромки [1—7]. Этот параметр при постоянных значениях переднего и заднего углов режущего клина отражает размерную износостойкость инструмента. В качестве исследуемого параметра износа инструмента использовали среднюю ширину фаски износа задней поверхности (без учета выемок). Ширину  $h_3$  фаски износа инструмента по задней поверхности измеряли с помощью отсчетного микроскопа МИР-2М с насадкой МОВ-15 с точностью отсчета до 0,002 мм. Для обеспечения достоверности результатов эксперимент повторяли 4—5 раз при отклонениях не более 3...4 % [2].

Для контроля углов резца использовали универсальные угломеры с точностью до  $1^\circ$ . При этом строго соблюдали постоянство условий заточки и доводки инструмента, радиус при вершине резца измеряли по шаблону и контролировали инструментальным микроскопом. Для экспериментальных исследований геометрической адаптации режущего клина применяли специально заточенные резцы (по задней поверхности с фаской  $f' = 30, 50$  и 100 мкм (рис. 1, *a*); по передней поверхности с фаской  $f' = 30, 50$  и 100 мкм и углом  $\gamma' = 10^\circ$  (рис. 1, *б*), с радиусом скругления вершины (рис. 1, *в*) и фрезы (с дополнительной фаской по ленточке и торцевой части (рис. 2)).

Резцы затачивали на универсально-заточном станке модели ЗА64Д и на станке ЗБ642 с применением алмазных кругов (без СОЖ).

При сверлении использовали двухленточные сверла из быстрорежущей стали Р6М5К5 для обработки коррозионно-стойких сталей ( $d = 9, 10$  мм;  $\varphi = 125^\circ$ ;  $\lambda = 12^\circ$ ).

Для обеспечения идентичности экспериментальных исследований режущий инструмент отбирали по результатам стойкостных

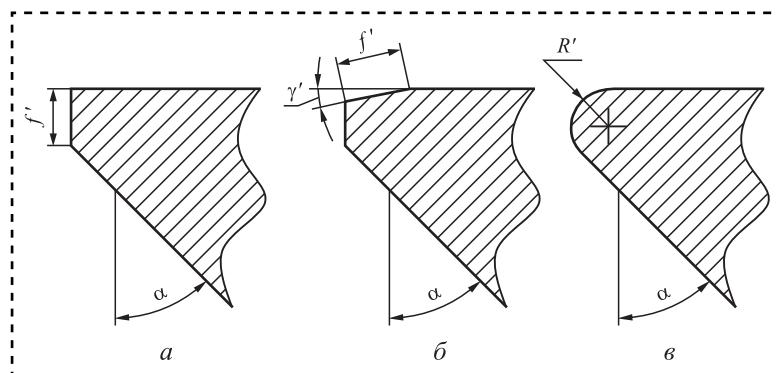


Рис. 1. Резцы с геометрической адаптацией режущего клина

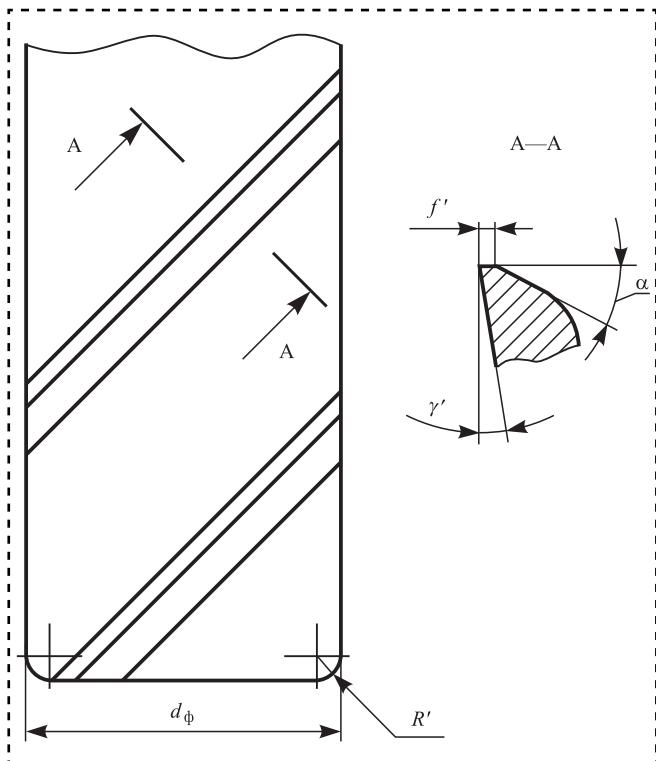


Рис. 2. Фреза с геометрической адаптацией режущего клина

испытаний и предварительной сортировки по величине ТЭДС при резании [2, 7].

Проведены натурные эксперименты при точении и фрезеровании в два этапа: на начальном этапе определяли оптимальную форму

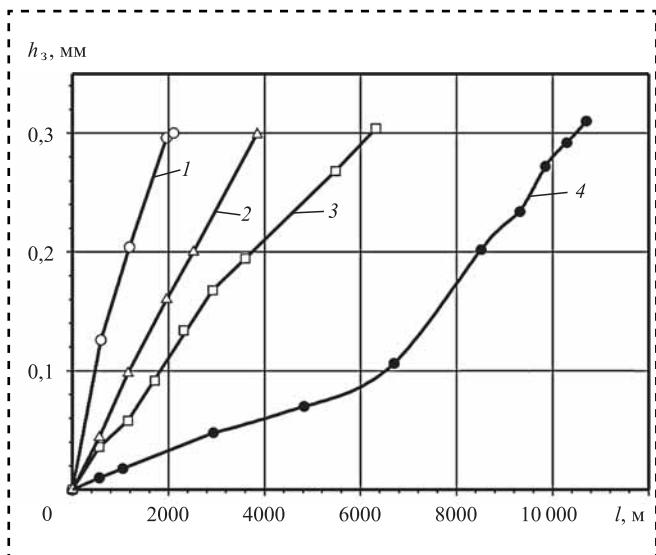


Рис. 3. Влияние длины пути резания на износ инструмента при точении стали 40Х – ТТ8К6 ( $v = 450$  м/мин;  $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм):

1 — без фаски; 2 — с фаской 30, 50 и 100 мкм; 3 — с фаской 30, 50 и 100 мкм и углом  $\gamma' = 10^\circ$ ; 4 — с радиусом скругления вершины

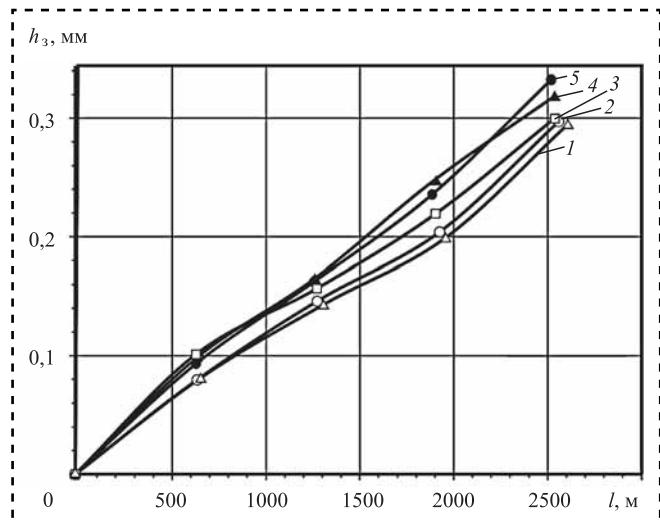


Рис. 4. Влияние длины пути резания на износ инструмента с различными фасками по передней поверхности режущего клина при точении стали 40Х – ТТ8К6 ( $v = 150$  м/мин;  $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм):  
1 — фаска 150 мкм; 2 — фаска 100 мкм; 3 — фаска 50 мкм; 4 — фаска 30 мкм; 5 — без фаски

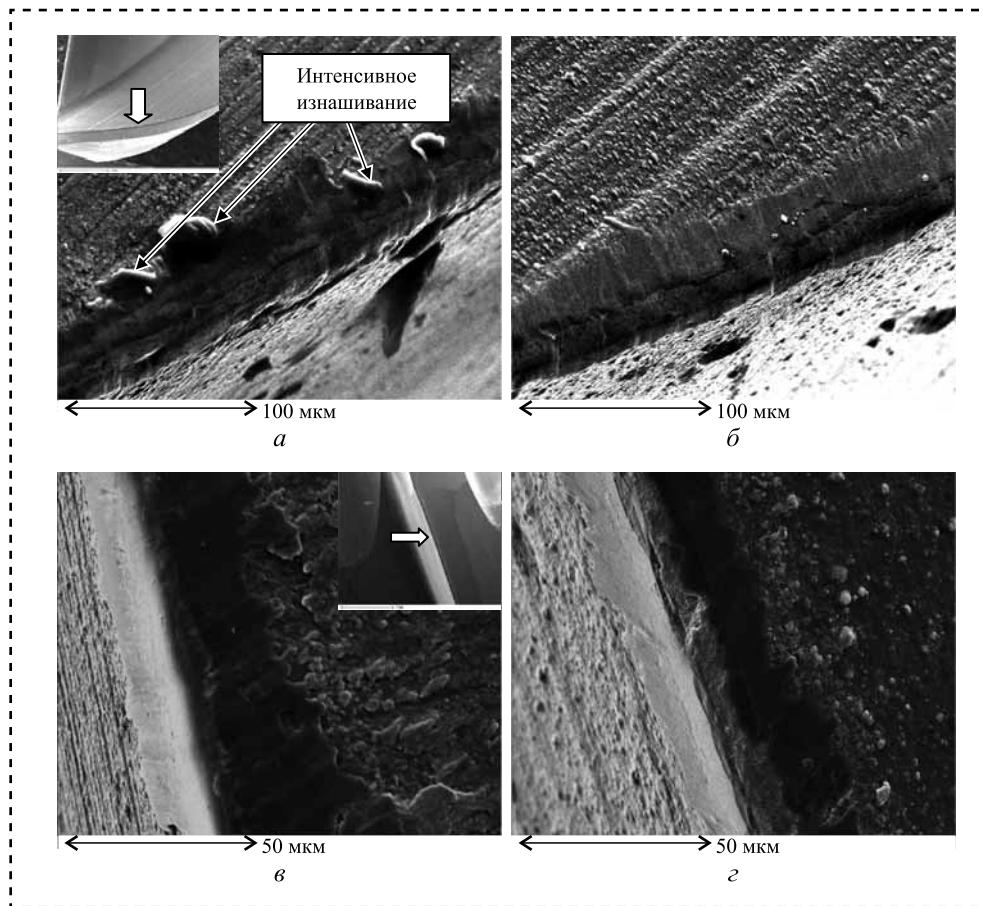
(рис. 3), т.е. расположение фаски на режущем клине, а затем и размеры фасок (рис. 4).

Анализ большого числа фотоснимков различных поверхностей режущего клина фрезы показал, что наиболее эффективна с точки зрения износостойкости и повышения качества поверхностного слоя деталей фаска 150 мкм. Это объясняется изменением характера и равномерности изнашивания по передней и задней поверхностям. Так, при фаске 50 мкм интенсивное изнашивание наблюдается вследствие микровыкрашивания режущего клина по передней поверхности (рис. 5, а) и неравномерного износа по ленте (дугообразная форма, рис. 5, в), в отличие от фаски 150 мкм, когда происходит равномерное истирание (ленточная форма, рис. 5, б, г).

По результатам экспериментальных исследований при различных формах геометрической адаптации установлено, что:

- износостойкость режущего инструмента при точении с различными режущими клиньями выше и наиболее благоприятна при фаске 30, 50 и 100 мкм и угле  $\gamma' = 10^\circ$ , при этом износостойкость повышалась на 75...90 % при оптимальных режимах резания;

- при высоких скоростях резания эффект от геометрической адаптации (рис. 3) значительно по сравнению с низкими скоростями реза-



**Рис. 5. Микрофотографии износа концевой фрезы ТТ8К6 (сталь 40Х;  $l = 1050$  м):**  
*а, б* — передняя поверхность фрезы; *в, г* — задняя поверхность фрезы; *а, в* — фреза с фаской 50 мкм; *б, г* — фреза с фаской 150 мкм

ния, что связано с изменением температурно-силовых условий резания;

— при фрезеровании положительное влияние на износостойкость фрезы с дополнительной фаской связано с повышением прочностных характеристик режущего клина и исключения их выкрашивания, что характерно для данной операции вследствие переменно-ударной работы зубьев инструмента.

#### Библиографический список

- Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.
- Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

3. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Пути повышения эффективности механической обработки резанием // Технология машиностроения. 2004. № 5. С. 19–22.

4. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. Л.: Машиностроение, 1990. 208 с.

5. Якубов Ф.Я., Ким В.А. Энергетика процесса самоорганизации при трении и изнашивании // Высокие технологии в машиностроении: сб. науч. трудов НТУ "ХП". Харьков. 2001. Вып. 1. С. 84–92.

6. Криони Н.К., Мигранов М.Ш. Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 327 с.

7. Мигранов М.Ш., Степанов А.А. Программа определения температурных полей в зоне резания "TempPole". Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2004611394 от 04.06.04 г.

# В ПОМОЩЬ КОНСТРУКТОРУ, ТЕХНОЛОГУ

УДК 621.756.65

**А.Я. Розинов, д-р техн. наук, В.В. Логунов**  
(ОАО "НПП "Компенсатор", г. Санкт-Петербург)  
Тел. 8 (812) 532-7742

## Диагностика возможности сокращения непроизводительных трудозатрат и механизации процесса сборки соединений наружной обшивки, подкрепленной ребрами жесткости

Представлены традиционные схемы сборки соединений обшивки и балок подкрепляющих ребер жесткости, указаны их недостатки. Приведена модель совершенствования процесса сборки и графики относительных отклонений кромок соединяемой обшивки и концов балок подкрепляющих ребер жесткости. Дан расчет сил сборки соединений обшивки и соединений балок подкрепляющих ребер жесткости. Приведены варианты схем механизированного приложения этих сил, а также данные сокращения трудозатрат в результате отказа от использования временно привариваемых элементов и изменения последовательности выполнения работ.

The traditional schemes of assembling the joining of cladding and beams of reinforcing ribs are presented, their shortcomings are indicated. A model of improving the assembly process and graphs of the relative values of deviations of the edges of the joined skin and the ends of the beams of reinforcing ribs are given. The calculation of the forces of the assembly of the plating joints and the joints of the beams of reinforcing ribs is given. Variants of the schemes of mechanized application of these forces are given, as well as data on the reduction of labor costs as a result of the rejection of the use of temporarily welded elements and a change in the sequence of work.

**Ключевые слова:** сборка, временно привариваемые элементы, модель совершенствования технологии, разностенность, замеры, относительные отклонения, физические модели изгиба, сборочные силы, модель механизации процесса сборки, технологические параметры, сокращение трудозатрат.

**Keywords:** assembly, temporarily weldable elements, technology improvement model, delimitation, measurements, relative deviations, physical bending models, assembly forces, assembly process mechanization model, technological parameters, labor cost reduction.

Традиционно при сборке соединений наружной обшивки, подкрепленной ребрами жесткости, представляющими собой тавровые балки или балки полособульбового профиля, первоначально выполняют соединение стыка обшивки (рис. 1, а), а затем соединение стыка балок набора (рис. 1, б), пересекающих стык соединенных кромок наружной обшивки.

В качестве устройств, создающих необходимые сборочные силы, используют сборочные клинья и временно привариваемые Г-образные скобы, а также планки для фиксации стыкуемых кромок. Изготовление

скоб и планок, их временная приварка перед началом сборки и удаления после завершения

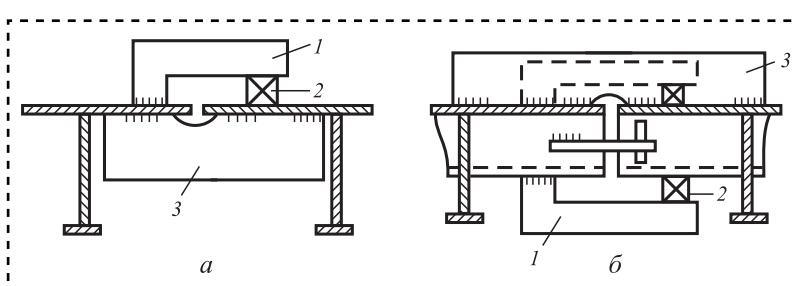


Рис. 1. Схемы сборки соединений кромок обшивки (а) и торцов пересекающего их набора (б):

1 — временно привариваемая Г-образная скоба; 2 — сборочный клин; 3 — временно привариваемая гребенка для фиксации кромок

Таблица 1

## Модель совершенствования процесса стапельной сборки соединений обшивки и ребер жесткости

Выполняемые операции	Эскиз
Смещение стенок соединяемых балок в единую плоскость с последующим закреплением на электроприхватках к поверхности каждой из частей соединяемой обшивки	
Выравнивание стенок балок ребер жесткости по их высоте вместе с присоединенными к ним на электроприхватках частями соединяемой обшивки. Скрепление соединяемых кромок обшивки и концов балок ребер жесткости электроприхватками	
Сварка соединений обшивки и балок ребер жесткости	—

сборочных работ, зачистка и подварка, а также правка поверхности наружной обшивки в местах установки и приварки приводит к не-производительным трудозатратам процесса сборки. По данным проведенного хронометража установлено, что на долю указанных не-производительных трудозатрат приходится до 30 % общих трудозатрат на сборку соединений наружной обшивки и балок ребер жесткости.

Изучение характера деформаций свободных кромок наружной обшивки и торцов ребер жесткости, подкрепляющих эти кромки, а также их положения в составе изготавливаемых металлоконструкций, позволяет считать, что количество временно привариваемых скоб и гребенок может быть существенно сокращено путем совершенствования технологии сборки соединений наружной обшивки и балок ребер жесткости (табл. 1).

Исключить тяжелый ручной труд при сборке соединений наружной обшивки, подкрепленной ребрами жесткости, можно путем механизации силовых операций этого процесса.

Цель работы — определение необходимых средств механизации и усовершенствование технологии механизированной сборки соединений наружной обшивки.

В процессе экспериментальных исследований определены величины фактических отклонений (разностенность) соединяемых кромок обшивки и концов балок ребер жесткости. Результаты замеров образующихся разностеностей при изготовлении различных металлоконструкций статистически обрабатывали и строили графики наибольших относительных отклонений кромок обшивки (рис. 2) и наибольших относительных отклонений стенок и поясков балок ребер жесткости (рис. 3).

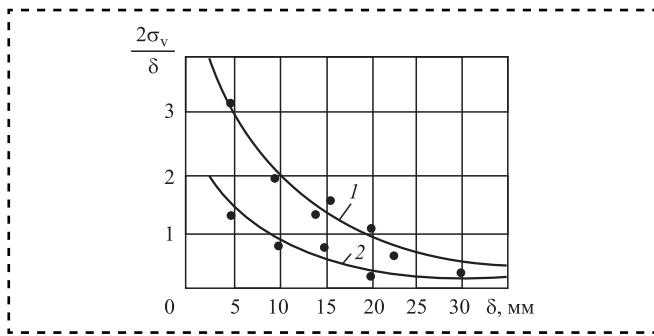
На основе построенных физических моделей изгиба кромок соединяемой обшивки получили формулы расчета сборочных сил, необходимых для соединений обшивки в местах расположения балок ребер жесткости, а также сил, необходимых для соединения обшивки между балками ребер жесткости:

$$P = \frac{3fEJ}{KS^3}; \quad (1)$$

$$P = \frac{\omega Eh^3}{bl\varepsilon}, \quad (2)$$

где  $P$  — сборочные силы;

$E$  — модуль нормальной упругости материала обшивки;



**Рис. 2. Наибольшие относительные отклонения кромок обшивки между балками ребер жесткости (1) и в местах положения этих балок (2):**

$\delta$  — толщина обшивки;  $\sigma_v$  — среднее квадратическое отклонение кромок соединяемой обшивки

$J$  — момент инерции балок ребер жесткости;  
 $\omega$  — функции перемещения наружной обшивки совместно с изгибом балок ребер жесткости,  $\omega = f(x) \cos \frac{\pi y}{S}$ , а между балками ребер жесткости  $\omega = \beta \left( \frac{x}{l} \right) \cos \frac{\pi y}{b}$ ;

$$f(x) = \frac{Px^3}{6} - \frac{Plx^2}{2};$$

$l$  и  $b$  — длина и ширина изгибающейся части наружной обшивки;

$x$  и  $y$  — координаты места приложения сборочной силы;

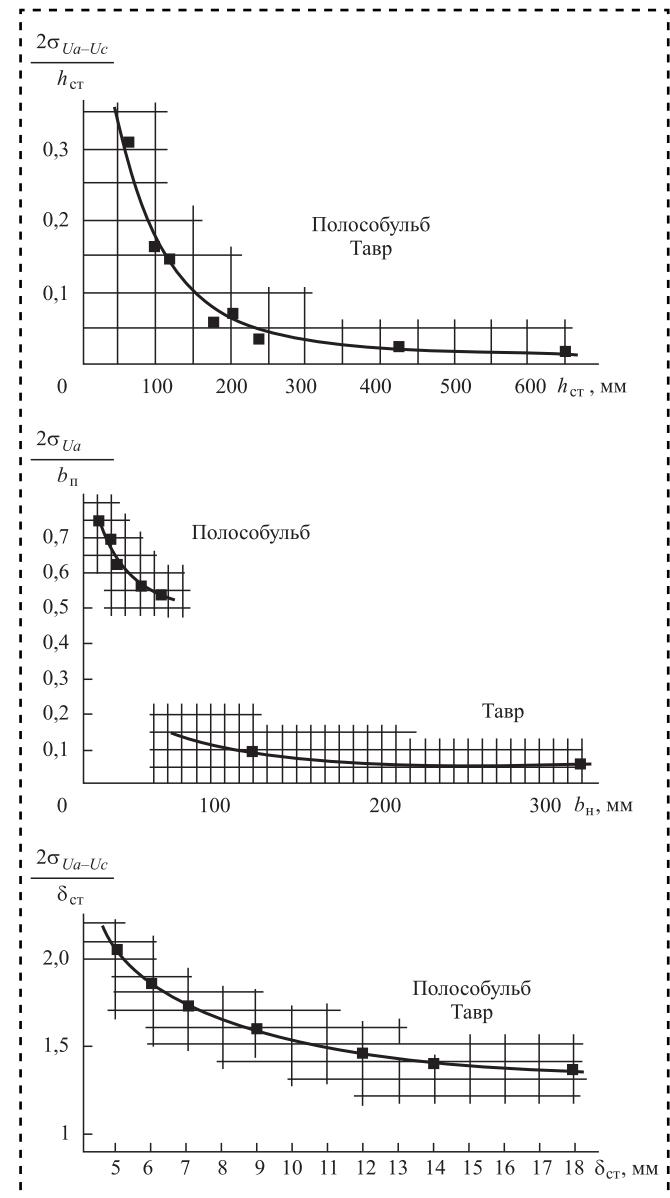
$S$  — расстояние между балками ребер жесткости;

$h$  — высота стенок этого набора;

$K$ ,  $\varepsilon$  и  $\beta$  — коэффициенты, для определения которых построены специальные графики.

На основе формул (1) и (2) исследовали сборочные силы, необходимые для выполнения соединений обшивки в местах расположения балок ребер жесткости и в промежутке между этими балками (рис. 4).

Аналитическая модель сборки соединений балок ребер жесткости представлена системой дифференциальных уравнений, характеризующих перемещение концов соединяемых балок в плоскости выполняемого стыка соединяемых кромок наружной обшивки, а также определяющих величину изгиба балок ребер жесткости, соединяемых в плоскости этих стенок, с учетом возможного поворота торцов этих балок в условиях чистого кручения под действием системы сборочных сил. На основе этой модели и графиков наибольших относительных отклонений стенок и поясков сое-



**Рис. 3. Наибольшие относительные отклонения стенок и поясков соединяемых балок ребер жесткости:**

$h_{ct}$ ,  $\delta_{ct}$  — высота и толщина стенки;  $b_n$  — толщина пояска;  $\sigma_{U_a-U_c}$ ,  $\sigma_{U_a}$  — средние квадратические отклонения стенок и поясков

диняемых балок ребер жесткости (см. рис. 3) выполнили аналитическое исследование сборочных сил, необходимых для выравнивания соединяемых балок ребер жесткости по высоте их стенок силой  $P_1$ , перемещения вдоль поясков этих балок силой  $P_2$  и поворота при скручивании сечений свободных от приварки концов балок под действием силы  $P_3$  (рис. 5).

Результаты анализа количественного изменения значений сборочных сил в зависимости от толщины соединяемой наружной обшивки и геометрических размеров совместно со-

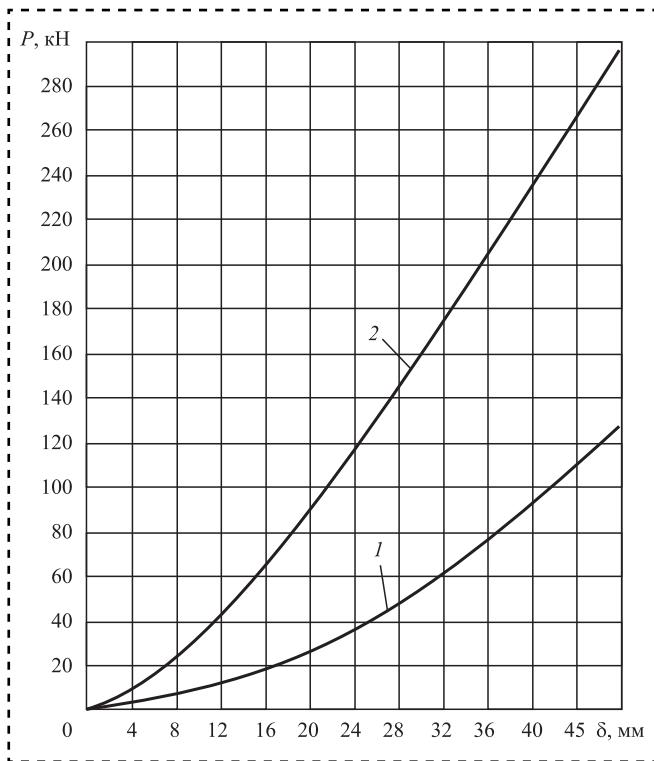


Рис. 4. Изменение сил сборки соединений кромок наружной обшивки между балками ребер жесткости (1) и в местах расположения на этих кромках этих балок (2)

единяемых с ней балок ребер жесткости позволили разработать два основных варианта приложения сборочных сил, соответствующих модели совершенствования процесса сборки соединений наружной обшивки и балок ребер жесткости (см. табл. 1), обеспечивающих механизацию этого процесса (рис. 6).

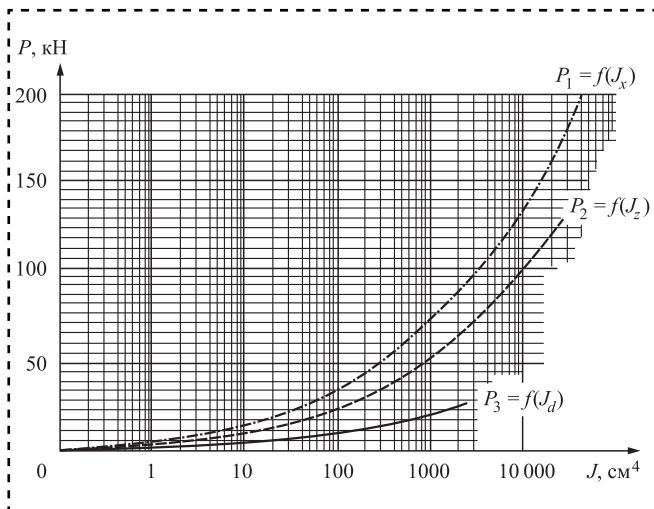


Рис. 5. Изменение сил сборки соединений балок ребер жесткости

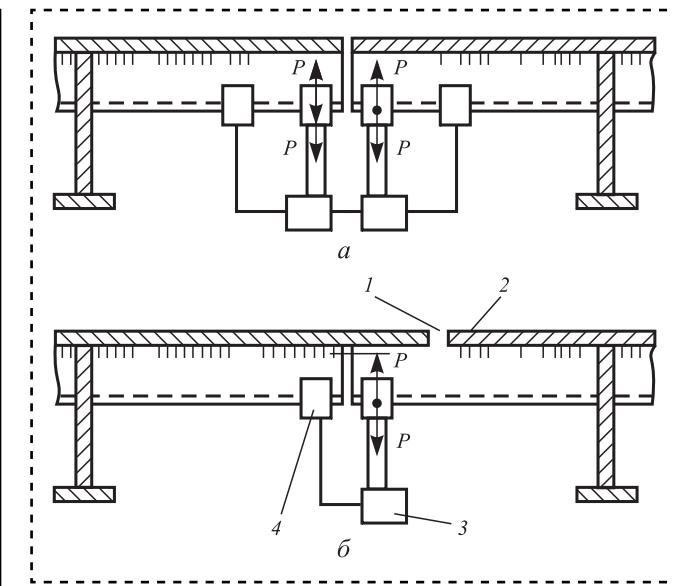


Рис. 6. Варианты схем механизированного приложения сил, необходимых для сборки соединений балок ребер жесткости, не приваренных концами к поверхности наружной обшивки (а) и приваренных к ней одним концом (б):

1 — сварочный зазор; 2 — неприваренный конец одной из соединяемых балок ребер жесткости; 3 — силовое устройство; 4 — фиксатор

Представленными на рис. 6 силовыми схемами обеспечивается возможность выполнения соединений наружной обшивки и балок ребер жесткости в случаях совпадения стыков кромок этой обшивки и концов соединяемых балок (рис. 6, а), а также в случаях разнесения (конструктивного несовпадения) соединений наружной обшивки и балок ребер жесткости (рис. 6, б). В обоих случаях сборочные силы прикладываются по замкнутой схеме. Однако в первом случае схема закрепления сборочного устройства и создания им сборочных сил симметричны, т.е. участвуют обе соединяемые балки. Во втором случае схема закрепления сборочного устройства и создания им сборочных сил — асимметрична, поскольку применяемое сборочное устройство закрепляют к одной из соединяемых балок, а силу, необходимую для обеспечения сборки, прикладывают к другой балке. При этом в обоих случаях размеры неприваренных участков стенок соединяемых балок ребер жесткости к поверхности соединяемой наружной обшивки должны соответствовать графику зависимости, приведенной на рис. 7.

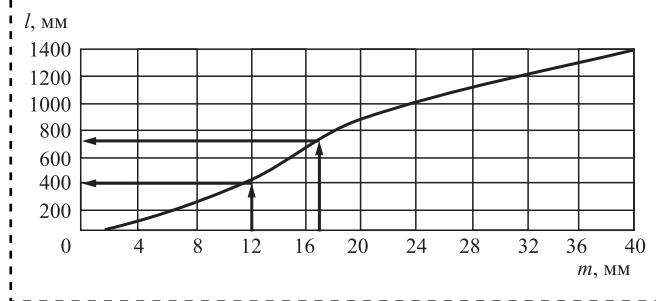
Реализация процесса сборки соединений наружной обшивки, подкрепленной ребрами



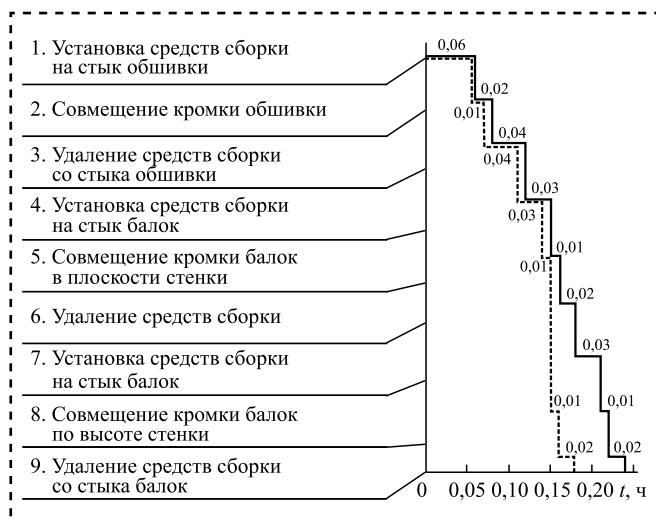
Таблица 2

**Показатели сокращения трудозатрат, связанных с использованием различных временно привариваемых подкреплений наружной обшивки и балок набора**

Временно привариваемые подкрепления	Сокращаемые операции	Трудо-затраты, нормо-ч
Г-образные скобы	Установка скобы	0,16
	Приварка скобы	0,18
	Удаление скобы	0,04
	Зачистка остатков сварки	0,20
	Подварка участков обшивки	0,07
	Зачистка мест подварки	0,07
Гребенки	Установка гребенки	0,18
	Приварка гребенки	0,20
	Удаление гребенки	0,05
	Зачистка остатков сварки	0,24
	Подварка участков обшивки	0,08
	Зачистка мест подварки	0,08



**Рис. 7. Зависимость длины свободного от приварки участка балок  $l$  ребер жесткости от размеров несовпадения  $t$  стенок соединяемых балок**



**Рис. 8. Типовая циклограмма распределения сокращаемых трудозатрат сборки, связанных с изменением последовательности выполнения работ:**

— традиционный процесс сборки; --- — процесс с измененной последовательностью выполнения сборки соединений обшивки и набора

жесткости, путем его механизации по схеме, представленной на рис. 6, обеспечивает возможность исключения:

Г-образных скоб для крепления сборочных клиньев, предназначенных для выравнивания кромок наружной обшивки, так как это выравнивание осуществляется совместно с заранее приваренными концами ребер жесткости;

Г-образных скоб для крепления сборочных клиньев, предназначенных для сведения концов балок ребер жесткости, так как это выравнивание осуществляется средством механизации закрепляемым неприваренным захватами за головки полособульбовых балок или поясков балок таврового профиля.

Наряду с этим механизация сборки по схеме рис. 6 позволяет уменьшить число планок подкрепляющих стык кромок соединяемой обшивки.

Предварительное соединение концов балок ребер жесткости с частями, подлежащими последующему соединению наружной обшивки, предусмотренное моделью совершенствования процесса сборки (см. табл. 1), позволяет добиться сокращения трудозатрат (табл. 2, рис. 8).



## ЧИТАЙТЕ В СЛЕДУЮЩЕМ НОМЕРЕ:

**Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Гришин Д.В.** Расширение технологических возможностей проходного резца за счет применения в конструкции дополнительной сборочной единицы

**Чмыхало И.А., Меделяев И.А., Челноков А.В., Спирягин В.В.** Разработка и применение акустико-диагностической установки для исследования параметров сигналов акустической эмиссии в теплообменных аппаратах при различных режимах эксплуатации

**Микаева С.А., Микаева А.С.** Сборка модулей для обеззараживания воздуха ультрафиолетовым излучением в системах вентиляции

**Панин С.В., Корниенко Л.А., Ле Тхи Ми Хиеп, Буслович Д.Г., Нгуен Дык Ань.** Многокомпонентные высокопрочные антифрикционные композиты на основе полифениленсульфида

**Гурьянов Г.Н., Гурьянов Н.Г.** Величина дельта-критерия формы очага деформации в зависимости от параметров процесса волочения круглого сплошного профиля

**Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Мигранов А.М.** Триботехнические характеристики режущего инструмента с ионно-модифицированной поверхностью

---

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2

Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

Адрес электронной почты издательства: [mashpubl@mashin.ru](mailto:mashpubl@mashin.ru);

редакции журнала: [sborka@mashin.ru](mailto:sborka@mashin.ru), <http://www.mashin.ru>.

Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.

Технический редактор Патрушева Е.М. Корректор Сажина Л.И.

Сдано в набор 10.07.2019. Подписано в печать 21.08.2019. Формат 60 × 88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.