

КЛЕИ. ГЕРМЕТИКИ. ТЕХНОЛОГИИ

8

2015



УДК 621.792.02

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗВИТЫХ МИКРОРЕЛЬЕФОВ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОГО ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОАДГЕЗИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.Н. Зубков, д-р техн. наук

МГТУ им. Н.Э. Баумана

(105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5; тел. +7 (499) 263-64-86; e-mail: zoubkovn@bmstu.ru)

Статья поступила 02.03.2015

Рассмотрены возможности использования способа деформирующего резания как средства создания микрорельефов на поверхности материалов с низкой адгезионной способностью с целью повышения прочности их клеевых соединений. Показано, что подготовка поверхности способом деформирующего резания способствует значительному повышению показателей прочности клеевых соединений.

Ключевые слова: деформирующее резание, микрорельеф, подготовка поверхности к склеиванию, клеевое соединение, низкоадгезионные полимерные материалы, фторопласт, СВМПЭ, углепластик, композиционные материалы, плакирование

Введение

В машиностроении существует большой класс деталей, функционирование которых определяется свойствами их поверхностного слоя при взаимодействии с ответными деталями или окружающей средой. В промышленности широко используют металлические сплавы, полимерные и композиционные материалы. Каждая группа имеет существенные преимущества перед другими по цене, показателям прочности, жесткости, износостойкости или другим характеристикам. Рациональным является совмещение преимуществ разнообразных видов конструкционных материалов в сборной конструкции детали, когда каждая составляющая сборочной единицы отвечает за свое функциональное назначение. Например, станина металлорежущего станка, выполненная из чугуна, отвечает за такие функции, как жесткость, прочность, демпфирующие способности и низкую стоимость, в то время как направляющие станины, выполненные из полимерного материала, отвечают за их износостойкость и низкий коэффициент трения. Для лопасти винта вертолета углепластик отвечает за низ-

кий вес при высокой прочности и жесткости, в то время как металлическая кромка лопасти винта отвечает за способность восприятия ударных нагрузок и эрозионную стойкость. Таких примеров можно привести множество, и ключевым в технологичности и надежности сборочного узла является метод сборки.

Клеевые соединения обладают способностью соединять разнообразные материалы, отличающиеся как по свойствам, так и по толщине, и не ослаблять соединяемые детали. Клеевые соединения обеспечивают герметичность, позволяют состыковать фасонные поверхности, не имеют выступающих частей. Иногда склеивание представляет собой единственно возможный способ соединения узловых деталей. К недостаткам клеевых соединений относят малое сопротивление отрывным нагрузкам, нестабильность физико-механических свойств, а также необходимость специальной подготовки поверхности под склеивание [1].

Современные клеи имеют высокую адгезию к полимерным композиционным материалам (ПКМ) на основе терморепактивной матрицы (стекло-, угле-, органопластики), однако прочность их адгезионного сцепления

как с металлами, так и с термопластичными полимерами недостаточна. Эта проблема наиболее актуальна при клеевом соединении низкоадгезионных термопластов, обладающих рядом уникальных свойств: низким коэффициентом трения, износостойкостью, высокой химической и эрозионной стойкостью. К ним относятся такие полимеры, как сверхвысокомолекулярный полиэтилен (UHMWPE, в России — СВМПЭ), полиэфирэфиркетон (PEEK), фторопласт Ф4 (PTFE) и др.

Создание специального микро- и макро- рельефа является наиболее перспективным методом обеспечения прочности клеевого со-

единения [2]. Данная статья посвящена повышению надежности клеевых соединений за счет подготовки склеиваемых поверхностей новым способом механической обработки — деформирующим резанием.

Экспериментальная часть

Деформирующее резание как средство подготовки поверхностей под склеивание.

Существенного повышения прочности и надежности как клеевых соединений, так и соединений, получаемых непосредственно при полимеризации связующего в процессе изготовления полимерных композиционных

материалов, можно достичь за счет создания регулярного мелкошагового микро- или макро- рельефа с большим отношением его высоты к шагу. Наиболее эффективно получение глубоких микро- и макро- рельефов деформирующим резанием (ДР).

Способ ДР основан на одновременном подрезании поверхностных слоев и их пластическом деформировании [3]. Подрезанный слой не отделяется полностью от заготовки, сохраняя с ней связь по своей узкой стороне (рис. 1). Совокупность подрезанных поверхностных слоев, которые сохранили сплошность своего соединения с заготовкой, образует на обработанной поверхности детали развитый макро- рельеф в виде оребрения (рис. 2) или штырьковых структур. Технология обладает высокой производительностью, широким диапазоном типоразмеров получаемого рельефа, и может быть реализована как

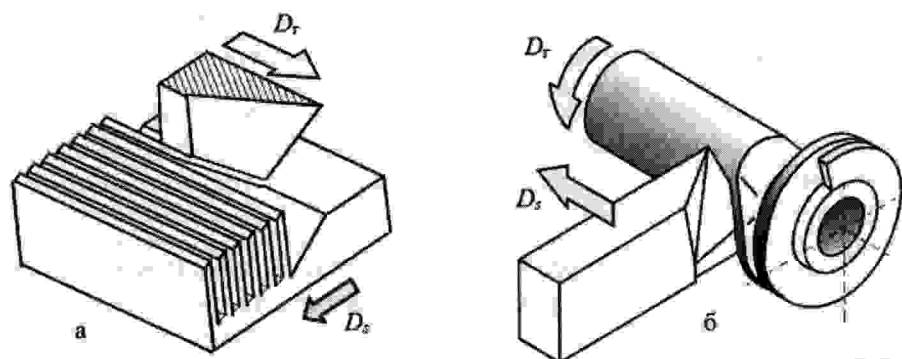


Рис. 1. Принцип деформирующего резания на плоских (а) и цилиндрических (б) поверхностях

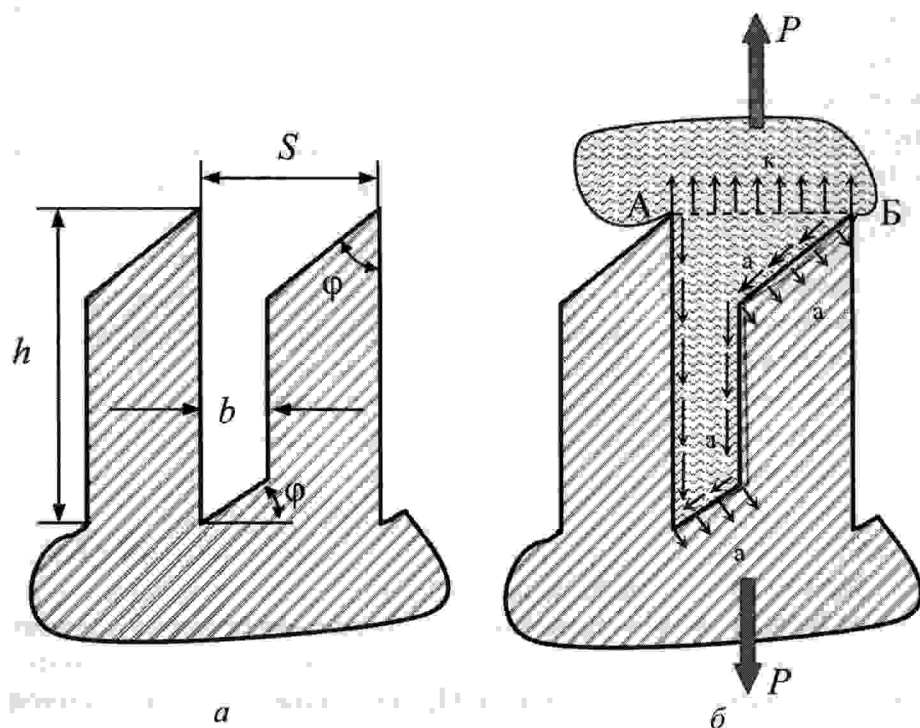


Рис. 2. Характерный профиль и параметры оребрения, получаемого ДР (а), и схема действующих напряжений при отрывном усилии на элемент клеевого соединения (б)

на специализированном, так и на унифицированном металлорежущем оборудовании [4]. Для обработки цилиндрических поверхностей и листовых заготовок (на оправках) используют станки токарной группы. Для обработки плоскостей используют фрезерные и строгальные станки. Технология ДР позволяет получать макрорельеф только на пластичных материалах, таких как медь, алюминий и их сплавы, титан, стали, термопластичные полимеры и др. Параметром, в наибольшей степени характеризующим пластичность материала, является величина относительного удлинения после разрыва δ_{10} . Для материалов с $\delta_{10} < 18\%$ подрезанный слой не остается в виде ребра на заготовке, а отделяется в виде стружки [5, 6].

Прочность клеевого соединения в межреберном зазоре. Рассмотрим вариант работы клеевого соединения на равномерный отрыв в межреберном зазоре, при этом деталь с низкими адгезионными характеристиками имеет микрорельеф, полученный ДР. Характерный профиль микрорельефа в виде оребрения, получаемого ДР, и его геометрические параметры представлены на рис. 2, а. Для вертикальных ребер существует следующая взаимосвязь параметров оребрения с технологическими параметрами обработки [3]:

- при токарной обработке шаг ребер S определяется подачей инструмента на оборот детали: $S = S_0$;
- при фрезерной обработке шаг ребер S определяется подачей на зуб: $S = S_{зуб}$;
- при строгании шаг ребер S определяется подачей на двойной ход: $S = S_{дв.х}$;
- ширина межреберного зазора (b) определяется шагом оребрения S и углом подрезания φ по зависимости $b = S \cdot (1 - \sin \varphi)$;
- угол при вершине ребра равен углу подрезания.

Прочность клеевого соединения обусловлена как адгезионным взаимодействием склеиваемых поверхностей с клеевой прослойкой, так и когезионной прочностью самого адгезива. Для обеспечения максимальной прочности клеевого соединения с подготовкой поверхности способом ДР важным является вопрос соотношения ширины и высоты межреберно-

го зазора (высоты ребра). Использование неглубоких канавок не обеспечит надежной адгезионной связи клеевого соединения. Ребра излишней высоты приведут к увеличению материалоемкости склеиваемой детали при усложнении технологии получения рельефа.

Рациональным является такой вариант работы клеевого соединения, при котором полностью реализуются показатели допустимой прочности клея на растяжение σ_k (когезионной прочности), т.е. когда разрушение происходит по линии А—Б (рис. 2, б) без отслоения от боковых сторон межреберного зазора. На рис. 2, б маленькими стрелками обозначены касательные τ_a и нормальные σ_a напряжения адгезионных связей на границе раздела клей—металл. На наклонные участки межреберного зазора (треугольное заострение ребра и дно межреберной впадины) воздействуют как нормальные σ_a , так и касательные τ_a напряжения. На вертикальные стенки воздействуют только касательные напряжения. Как допущение примем равномерность распределения нормальных и касательных напряжений по периметру межреберной впадины. Такой подход правомерен для оценочного расчета и применяется для клеевых соединений малой протяженности [1], что характерно для участков межреберного зазора.

Условие полной реализации когезионной прочности адгезива означает то, что суммарная прочность адгезионных связей на сдвиг и растяжение по периметру межреберного зазора должна быть выше, чем прочность клея на растяжение по линии А—Б. Данное положение позволяет минимизировать высоту микрорельефа при обеспечении максимальной прочности клеевого соединения. Усилие, необходимое для когезионного разрушения клея на длине участка, равного шагу оребрения, составит $P = [\sigma_k] \cdot S$, где $[\sigma_k]$ — допустимая прочность клея на равномерное растяжение.

Суммарная составляющая касательных и нормальных напряжений адгезионных связей на направление действия растягивающего усилия с учетом длины их действия на отдельных участках запишется как:

$$P = \left(\frac{[\tau_a] \cdot S \cdot \sin \varphi}{\sin \varphi} \right) \cdot \cos \varphi + \left(\frac{[\sigma_a] \cdot S \cdot \sin \varphi}{\sin \varphi} \right) \cdot \sin \varphi +$$

$$+ [\tau_a] \cdot \left(h - \frac{S \cdot \sin \varphi}{\operatorname{tg} \varphi} - \frac{S - S \cdot \sin \varphi}{\operatorname{tg} \varphi} \right) +$$

$$+ \left(\frac{[\tau_a] \cdot (S - S \cdot \sin \varphi)}{\cos \varphi} \right) \cdot \sin \varphi +$$

$$+ \left(\frac{[\sigma_a] \cdot (S - S \cdot \sin \varphi)}{\cos \varphi} \right) \cdot \cos \varphi + [\tau_a] \cdot h,$$

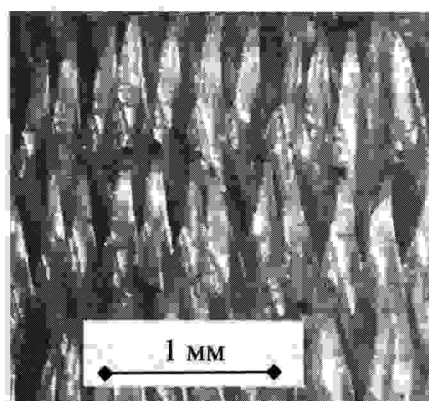
где $[\tau_a]$ — предел прочности адгезионной связи клея со склеиваемым материалом на сдвиг; $[\sigma_a]$ — предел прочности адгезионной связи клея со склеиваемым материалом на равномерное растяжение; h — высота ребер; S — шаг ребер; φ — угол подрезания (главный угол инструмента для ДР в плане).

Приравняв прочность клея на растяжение на длине участка, равного шагу оребрения, сумме составляющих адгезионного взаимодействия по периметру межреберного зазора, после упрощения получим:

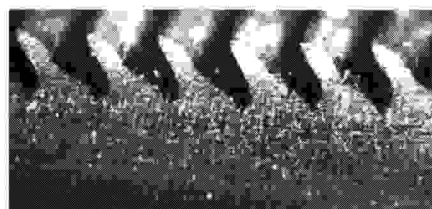
$$[\sigma_k] \cdot S = [\sigma_a] \cdot S \cdot \sin \varphi +$$

$$+ [\sigma_a] \cdot S \cdot (1 - \sin \varphi) + 2 \cdot [\tau_a] \cdot h.$$

Из этого выражения можно получить минимальную высоту межреберного зазора для данного шага оребрения, обеспечивающую отсутствие адгезионного разрушения по его периметру (т.е. обеспечивающую максимальную прочность клеевого соединения, исходя из предела его прочности на равномерное растяжение):



а



б

Рис. 3. Микростырьковая поверхность СВМПЭ для склеивания (а) и вид на углеэпоксидный клей после отслаивания микрооребрённой ленты СВМПЭ (б)

$$h \geq \frac{S \cdot ([\sigma_k] - [\sigma_a])}{2 \cdot [\tau_a]}.$$

Как видно из этого выражения, микро-рельеф необходим в первую очередь для адгезивов, имеющих значительную разницу между когезионным и адгезионным пределами прочности: чем больше отличие в этих показателях, тем для данного сочетания клей—металл должен быть глубже межреберный зазор.

Вторым важным выводом, который можно сделать при анализе этой формулы, является отсутствие в ней угла подрезания, который определяет соотношение ширины межреберного зазора к шагу: $\frac{b}{S} = 1 - \sin \varphi$, — т.е. на проч-




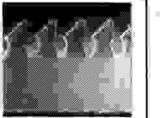
ность клеевого соединения не влияет используемая ширина межреберного зазора (для данного шага и высоты оребрения).

Реализация подготовки поверхностей под склеивание способом ДР. Для оценки эффективности использования микро-рельефов, полученных ДР с целью увеличения прочности клеевого соединения, выбраны материалы, обладающие низкой адгезионной способностью: коррозионностойкая сталь аустенитного класса 316L (ближайший российский аналог — сталь 03X17H14M3), фторопласт Ф4 и СВМПЭ.

В табл. 1 указаны параметры образцов с микро-рельефом, полученным ДР. Для образцов № 1—4 в табл. 1 показаны поперечные срезы рельефов, для образца № 5 приведена фотография структуры при виде сверху (рис. 3, а).

Микро-рельеф образца № 1 на стальных образцах выполняли на полосе с исходной толщиной 0,76 мм, микро-рельеф образца № 2 — на одной стороне фторопластового куба, имеющего сторону 11 мм, микро-рельеф на образцах № 4—6 — на ленте из СВМПЭ (шириной 10 и толщиной 0,8 мм). Ленту получали строгани-

1. Параметры микрорельефа склеиваемых образцов и условий испытаний

Наименование показателя	Номер образца				
	1	2	3	4	5
Приклеиваемый материал	Сталь 316L	Фторопласт Ф4	СВМПЭ	СВМПЭ	СВМПЭ
Вид структуры					См. рис. 3, а
Шаг структуры, мм	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3
Высота структуры, мм	0,67	1,0	0,55	0,4	0,3
Межреберный зазор, мм	0,16	0,15	0,15	0,13/0,06*	
Наклон ребер (штырьков), град.	8	15	32	0	70
Материал ответной детали	Углепластик	Фторопласт Ф4		Углепластик	
Марка клея	Toolfusion 1A/1B фирмы «Airtech»	Эпоксидный клей ЭДП (г. Дзержинск, ТУ 07510508.90—94)		Araldite 2011 фирмы «Huntsman Corporation»	

* Указан межреберный зазор в нижней расширенной и наиболее узкой частях соответственно.

ем торца листа (толщиной 10 мм) свободным резанием. При получении рельефов на полимерах учитывали особенности их обработки способом ДР, изложенные в [7].

Для увеличения прочности клеевого соединения микрорельеф на всех образцах имел наклон. При испытаниях образца № 1 на отслаивание и образца № 2 на равномерное растяжение зафиксировано отсутствие вырывания клея из межреберного зазора. Разрушение происходило по клею. Для образцов из СВМПЭ (№ 3) даже использование наклонного оребрения с большим углом наклона ребер, составляющим 32°, при испытаниях на отслаивание сопровождалось отсутствием когезионного разрушения. Эпоксидный клей «выскальзывал» из наклонного межреберного зазора. На рис. 3, б показан участок с эпоксидным клеем после отслоения СВМП, который остался на углепластике и является репликой формы межреберных зазоров образца № 3. Данный факт потребовал поиска других конфигураций микрорельефа на СВМПЭ, которые были реализованы на образцах №№ 4 и 5. Межреберный зазор на образце № 4 имеет расширение в нижней части, образуя для полимеризовавшегося клея замковую полость. Ширина межреберного зазора в расширенной части составляла 130 мкм, в узкой части — 60 мкм. Принцип получения таких подповерхностных полостей способом ДР описан в [8].

Микрорельеф на образце № 5 получен двойным оребрением ленты из СВМП с шагом ребер на каждом проходе 0,3 мм, с углом пересечения проходов 13°. В результате обработки штырьковая поверхность ленты представляла по своей сути множество наклонных «ворсинок» длиной 1,3 мм. В сечении штырек имел форму ромба со стороной 0,15 мм. Наклон штырьков составлял 70° от вертикали. На каждом квадратном сантиметре располагалось 500 штырьков. Принцип получения штырьковых структур описан в [9, 10].

При испытаниях на маятниковом копре Walter + Bai AG PH150 с энергией удара 50 Дж зафиксирована энергия разрушения образца № 1 $A_n = 11,5$ Дж, что дало величину удельной ударной вязкости $a_n = 228$ кДж/м². У образцов с лакирующим металлическим слоем без микрорельефа происходило его полное отслоение от углепластика (рис. 4, а), в то время как для образцов № 1 расслоение происходило по слоям углеткани (рис. 4, б). Повышение величины удельной ударной вязкости образца № 1 по сравнению с углепластиковыми образцами, лакированными листами без микрорельефа, составило 60%.

При испытаниях образца № 1 на отслоение под 90° на универсальной испытательной машине INSTRON 600-DX зафиксировано многократное повышение усилия на отслаивание металлического листа от углепластика, имеющего микрорельеф (рис. 5, а), по сравнению



Рис. 4. Образцы склеивания стали 316L с углепластиком после испытаний на копре: *а* — образец без микрорельефа на металлической полосе; *б* — образец с микрорельефом на металлической полосе

с аналогичными гладкими пластинами. Для оребренного образца № 1 происходило когезионное разрушение без вырывания эпоксидного связующего из микрорельефа (рис. 5, *б*). Среднее погонное разрушающее усилие составило $P_{отсл} = 6,8$ кН/м. Пластины без микрорельефа отслаивались одновременно сразу по всей площади склейки при усилии, на порядок меньшем.

Примером склеивания фторопласта является образец № 2. Кубики фторопласта Ф4 склеивали сторонами с нанесенным микрорельефом. Оценку прочности клеевого соединения проводили на равномерное растяжение, фиксируя усилие отрыва динамометром модели 9257В фирмы «Kistler». При использовании эпоксидного клея ЭДП наибольшую нагрузку выдержала пара склеенных образцов, которые имели взаимно перпендикулярные направления микрорезбер на сторонах кубиков.

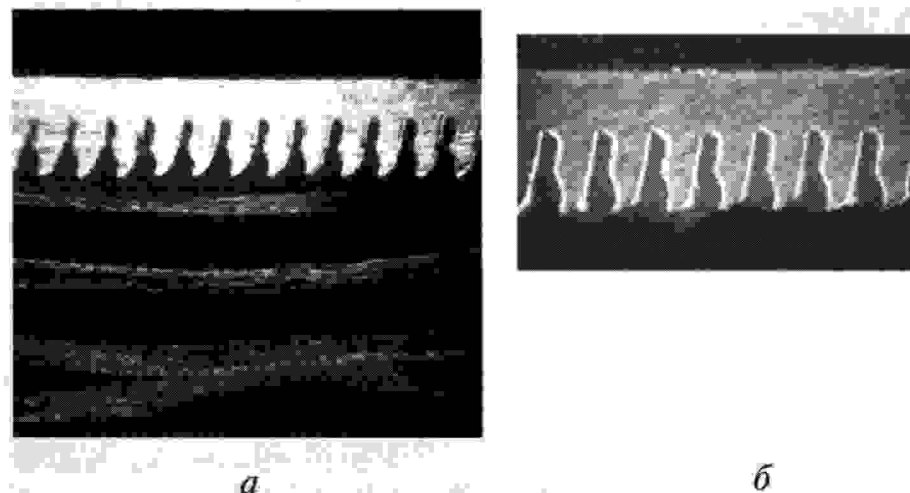


Рис. 5. Поперечный срез соединения металл—углепластик до испытаний (*а*) и после отслаивания металлической пластины от углепластика с оставшимся в межреберном зазоре металла эпоксидным клеем (*б*)

Максимальная прочность на растяжение составила 12 МПа.

Полосы из СВМПЭ, склеенные эпоксидным клеем Araldite 2011, подвергали испытаниям на отслоение под углом 90° от углепластика. Направление микроорегрения было вдоль отслаиваемой полосы.

Результаты испытаний представлены в табл. 2.

2. Прочность при отслаивании полосы СВМПЭ от углепластика

Наименование показателя	Способ подготовки поверхности СВМПЭ-полосы				
	Деформирующим резанием (ДР)			Крупнозернистой шлифовальной шкуркой	
	Образец				
	№ 3	№ 4	№ 5	Без подготовки	
Прочность при отслаивании, кН/м	1,2	1,7	4,5	1,0	0,15

Подготовка поверхности низкоадгезионных материалов под склеивание способом ДР в ряде случаев позволяет качественно изменить механизм разрушения клеевого соединения с адгезионного на когезионный. При склеивании металла с углепластиком микроорегрение на металле позволяет повысить прочность клеевого соединения

до уровня прочности матрицы углепластика. Для фторопласта при испытаниях на равномерный отрыв максимальная прочность клеевого шва составила 12 МПа, что всего в два раза ниже прочности на растяжение фторопласта Ф4 общего назначения, которая составляет 23 МПа по ГОСТ 10007—80. При испытаниях на отслоение СВМПЭ от углепластика рельеф в виде наклонного микроорегрения (образец № 3)

не дал значимых результатов по сравнению с подготовкой крупнозернистой шлифовальной шкуркой. Наклонные ребра не обеспечивали замкового соединения, происходило адгезионное отслоение. Межреберный зазор с расширением в нижней части (образец № 4) обеспечивал анкерный (замковый) эффект. Эпоксидный клей оставался в расширении межреберного зазора, его разрушение происходило в самой узкой части, имеющей ширину 70 мкм. Это привело к увеличению прочности. Однако для образца № 4 суммарная площадь клеевых мостиков, работающих на растяжение, в пять раз меньше, чем площадь склеиваемой поверхности, что не позволило полностью реализовать прочность эпоксидного клея. При испытаниях СВМП на отслаивание самой эффективной по критерию прочности оказалась склеиваемая поверхность в виде наклонных микроштырьков (образец № 5): в этом случае величина прочности на отслаивание превысила в пять раз аналогичную прочность для поверхности, подготовленной крупнозернистой шлифовальной шкуркой.

Несомненно, представленные варианты форм и размеров микрорельефов не являются оптимальными, однако первые результаты прочностных испытаний доказывают перспективность использования способа ДР для повышения прочности клеевых соединений материалов, обладающих низкими адгезионными свойствами.*

* Публикация подготовлена в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ. Автор выражает благодарность студентам МГТУ им. Н.Э. Баумана — И. В. Бизину (формализовал условие равнопрочности для клеевых зазоров в вертикальном орebrении), С. С. Смирнову (подготовил ряд образцов на СВМПЭ и провел их испытания), М. М. Буслюку (провел эксперименты по склеиванию фторопласта), а также ООО «Политермо» в лице М. Ю. Ощепкова и А. В. Арсатова за предоставление материалов для проведения экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Склеивание** в машиностроении: Справочник: В 2 т. / [Д. А. Аронович и др.]; под общ. ред. Г. В. Малышевой. Москва, 2005.
2. **Черевашенко А. С.** Конструктивно-технологические решения соединений металл — композит, работающих на отрыв // Сб. науч. тр. ХАИ «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов». Харьков: ХАИ, 2013. Вып. 1 (73). С. 14—20.
3. **Зубков Н. Н.** Особенности реализации метода деформирующего резания // Технология машиностроения. 2001. № 1. С. 19.
4. **Зубков Н. Н.** Ремонт, восстановление и модернизация на основе метода деформирующего резания // Ремонт, восстановление, модернизация. 2003. № 10. С. 7.
5. **Solovyeva L., Zubkov N., Lisowsky B., Elmoursi A.** Novel electrical joints using deformation machining technology: Part I: Computer modeling // Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on. 2012. 2 (10), pp. 1711—1717.
6. **Solovyeva L., Zubkov N., Lisowsky B., Elmoursi A.** Novel electrical joints using deformation machining technology: Part II: Experimental verification // Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on. 2012. 2 (10), pp. 1718—1722.
7. **Zubkov N. N., Sleptsov A. D.** Production of slotted polymer filter tubes by deformational cutting // Russian Engineering Research. 2010. 30 (12), pp. 1231—1233.
8. **Зубков Н. Н.** Получение подповерхностных полостей деформирующим резанием для интенсификации пузырькового кипения // Вестник машиностроения. 2014. № 11. С. 75—79.
9. **Зубков Н. Н., Трофимович А. С., Овчинников А. И., Цфасман Г. Ю., Городников В. В.** Получение штырьковых структур для кипения азота // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2013. № 1 (90). С. 100—109.
10. **Popov I. A., Zubkov N. N., Kas'kov S. I., Shchelchikov A. V.** Heat transfer during the boiling of liquid on microstructured surfaces: Part 1: Heat transfer during the boiling of water // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). 2013. 60 (3), pp. 157—165.