

# Методика исследования процесса смятия микровыступов на контактных поверхностях и кинетики контактного взаимодействия между разнородными материалами

В. В. Абрамов, Ю. П. Ракунов

Разработана методика исследования контактного взаимодействия между разнородными материалами при термомеханическом воздействии во времени. Построены кинетические кривые образования контакта, пластической деформации микровыступов, высоты микровыступов, изменения контактных напряжений на микровыступах, изменения механических свойств на поверхности и глубине приконтактного объема микровыступов от комнатных до предплавильных температур и интервале давлений до и после пороговых значений. Рассмотрен характер смятия и кинетика контактного взаимодействия между разнородными материалами с резко различной сопротивляемостью пластической деформации и природой химической связи при термомеханическом воздействии.

#### Ключевые слова:

методика исследования, контактное взаимодействие, характер смятия микровыступов, кинетика, действительный и физический контакт, пластическая деформация, сапфир, микронапряжения 2-го рода, выглаживание, схватывание

УДК 621.9 | ВАК 2.5.5

DOI: 10.22184/2499-9407.2025.38.1.46.53

## Введение

Развитие науки и техники предъявляет повышенные требования к проектируемым машинам и оборудованию, приборам и аппаратам по геометрии деталей и узлов, прочности и надежности с сохранением исходных

физико-механических и химических свойств при длительной эксплуатации, в том числе в экстремальных условиях и агрессивных средах. Это вызывает необходимость применения новых материалов или ранее известных, но в новых сочетаниях. Это, в свою очередь, вызывает необходимость

получения прецизионного разъемного или неразъемного соединения последних в одноименном, разноименном или разнородном сочетании без изменения их исходных свойств.

Одним из путей решения этой проблемы является исследование контактного взаимодействия между материалами в твердой фазе при деформационном или термодформационном воздействии и разработка на этой основе новых схем технологических процессов (ТП) получения высококочистых поверхностей и прецизионных соединений без изменения их исходных физико-механических свойств. Особое место среди них занимают ТП, основанные на пластической деформации микровыступов контактных поверхностей (сварка давлением с нагревом, прессование и спекание ультрадисперсных порошков, получение высококочистых поверхностей металлов с регулируемыми свойствами и геометрией и т. д.). В этом случае обеспечивается эффективность ТП в части максимального сохранения исходного комплекса свойств материалов и регулирования степени прецизионности контакта.

С одной стороны, прецизионность соединения предусматривает не только контроль и регулирование деформации микрорельефа в зоне контакта, но также проведение предварительной обработки контактных поверхностей материалов, в том числе методами, основанными на пластическом формоизменении поверхностей путем выглаживания натуральными и синтетическими сверхтвердыми материалами. С другой стороны, получение неразъемного прецизионного соединения требует знания кинетики и сущности процессов, протекающих на контактных поверхностях при термодформационном воздействии на них. Это предполагает наличие прямых экспериментальных данных по кинетике развития отдельных стадий процесса, что, в свою очередь, позволяет разработать пути управления и регулирования ТП получения прецизионного соединения в целом.

В этой связи проблему контактного взаимодействия при деформационной или термодформационном воздействии, включающую в себя и образование соединения, необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. установление кинетических закономерностей образования контакта между поверхностями за счет пластической деформации микровыступов обработки с учетом изменения механических и упругих свойств металла, геометрических характеристик поверхности. Это позволяет решить вопрос прецизионности соединения;
2. выяснение природы активации поверхности более твердого материала в контакте с более мягким металлом и установлении кинетических закономерностей развития схватывания (роста прочности) между ними. Это позволяет решить вопрос получения прецизионного неразъемного соединения.

Рассмотрение проблемы контактного взаимодействия в указанных аспектах позволяет выйти на разработку новых ТП получения прецизионного разъемного и неразъемного соединения материалов в различном сочетании, в том числе при температурах ниже  $0,5T_{пл}$  металла с сохранением исходных физико-механических свойств и геометрии изделий.

Целью работы являлось установление влияния уровня термодформационного воздействия на характер смятия микровыступов при формировании контакта, кинетику развития контакта за счет пластической деформации микровыступов, изменение механических свойств на поверхности контактных площадок и приконтактном объеме, а также оценка уровня возникающих микронапряжений 2-го рода, компенсированных в объеме зерна микровыступа, в условиях сварки давлением с нагревом разнородных материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации и природой химической связи.

### Материалы и методы исследования

Получение неразъемного соединения при контактом взаимодействии материалов под давлением с нагревом является результатом протекания ряда взаимосвязанных элементарных процессов и, согласно современным представлениям, протекает в три основные стадии [1–3]:

1. образование физического контакта;
2. активация атомов соединяемых поверхностей, находящихся в состоянии физического контакта, и образование прочных химических (металлических) связей;
3. релаксационная стадия (образование общих зерен, объемное взаимодействие, диффузионные процессы и др.).

В связи с одновременностью протекания этих процессов в пятнах микроскопического контакта, проведение технологических испытаний не позволяет дифференцированно оценить вклад каждой стадии в общую картину образования соединения. Для установления закономерностей развития каждой стадии процесса необходимо применение и разработка специальных методик и методов аналитического расчета.

В ряде работ ([4–9] и др.) экспериментально исследованы особенности образования упругого, пластического и упруго-пластического контакта в зависимости от различных параметров. Однако работ, посвященных системному исследованию кинетики образования и развития действительного контакта и переходящего в состояние физического контакта за счет пластической деформации микровыступов свариваемых поверхностей, практически нет. Не установлены качественные и количественные кинетические закономерности смятия микровыступов в контакте, изменения механических свойств на поверхности контактных площадок и объеме микровыступов, не определены величины контактных напряжений в объеме микровыступов

и кинетика их изменений, а также их основной роли в активации контактных поверхностей. Кроме того, наблюдается большое расхождение экспериментальных и прогнозируемых результатов, получаемых при решении известных уравнений для определения отдельных стадий процесса [3, 7, 10]. Общим недостатком этих уравнений является то, что в них заложены параметры объемной ползучести, тогда как образование действительного и физического контакта происходит за счет пластической деформации микровыступов обработки. Это сдерживалось отсутствием простой и объективной методики, позволяющей системно и с высокой точностью установить количественные и качественные закономерности образования контакта, пластической деформации микровыступов, их смятия и формоизменения непосредственно на контактных поверхностях в условиях сварки давлением с нагревом и чистовой отделочной обработки (выглаживанием) синтетическими сверхтвердыми материалами (СТМ).

Экспериментальные исследования контактных поверхностей выполняли по методике профилографирования и фрактографии (оптической и электронной микроскопии) фиксированного участка [11]. Статистическая обработка изменения показателей шероховатости контактных поверхностей проводилась специальной компьютерной программой профилографа-профилометра мод. 201 с ИВК [12] (радиус иглы профилографа 2 мкм. вертикальное (ВУ) и горизонтальное (ГУ) увеличение: от 1000 до 100 000 крат и от 200 до 4 000 крат, соответственно) и записывалось автоматически на электротермическую бумагу. Изменение механических свойств на поверхности контактных площадок и по глубине приконтактного объема микровыступов оценивали путем измерения микротвердости (HV) на приборе ПМТ-3 при нагрузке  $P = 0,5\text{Н}$  (50 гс). На исследуемой поверхности отпечатками алмазной пирамиды прибора ПМТ-3 отмечали фиксированный участок (рис. 1 а, б) до и после приложения нагрузки. С фиксированного участка снимали профилограммы до и после нагружения; контрольные замеры высоты и ширины основания микровыступов выполняли на двойном микроскопе МИС-11. Для наблюдения и настройки иглы профилографа применялась бинокулярная оптическая

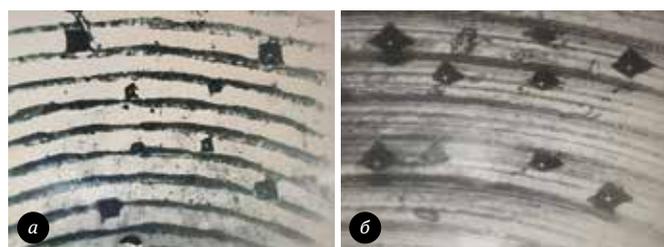


Рис. 1. Фрактография контактной поверхности до (а) и после (б) нагружения; обработка поверхности – точение,  $R_z = 3,2\text{--}6,3$  мкм;  $\times 110$

головка микроскопа МБС; фиксированный участок фотографировали после каждого нагружения через сапфир.

Исследования выполняли на парах: металл (медь МБ, никель НВК, сплав 50Н) – синтетический монокристаллический оптически прозрачный сапфир (корунд) 60°-ной ориентации к оси роста и обработкой рабочей поверхности –  $R_z = 0,03$  мкм. Выбор сапфира обусловлен тем, что он обладает исключительно благоприятным практическим комплексом свойств: высокая твердость – 9 ед. по шкале Мооса, высокая температура плавления, высокая сопротивляемость ползучести, нулевое водопоглощение и др., а также относительная дешевизна производства, что обуславливает его широкое применение в технике как конструкционного материала [13, 14, 15].

В данной работе приведены экспериментальные результаты, полученные для пары (медь + сапфир, сплав 50Н). Образцы меди после механической обработки подвергали отжигу в среде водорода при  $T = 650$  °С в течение 45 мин; контактные поверхности обрабатывали точением с  $R_z = 3,2\text{--}6,3\text{--}10$  мкм и строганием с  $R_z = 40\text{--}80$  мкм; длина образцов – 25 мм, диаметр – 12 мм; опорные поверхности образцов шлифовали, непараллельность торцов не более 0,002 мм. Нагружение выполняли на установке для диффузионной сварки типа А306.08; степень разрежения составляла  $(1\text{--}5) \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. Температура определялась хромель-алюмелевой (ХА) термопарой и контролировалась прибором МПЩПр – 54.

Нагружение контактной (свариваемой) поверхности выполняли следующим образом. Образец в приспособлении (рис. 2 а, б) помещали в камеру, где создавали вакуум и нагревали до температуры процесса; к контактной поверхности через сапфировый диск.

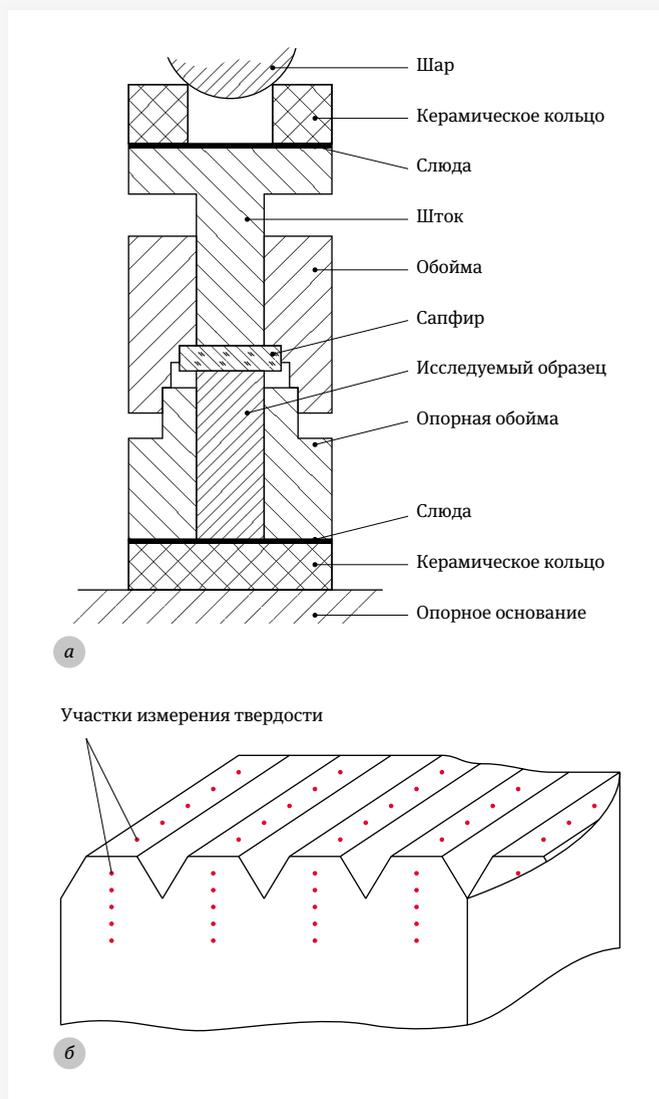
Прикладывали внешнее (сварочное) давление ( $P$ ); длительность воздействия изменялась от 10...15...30 с до нескольких десятков минут и определялась конкретными задачами процесса выглаживания или сварки. Таким образом, схемы процессов обработки металлической поверхности плоским сапфировым диском и его сварки давлением с нагревом аналогичны, кроме некоторых особенностей технологии [15, 16].

После выдержки образцов в приспособлении при заданных ( $T$ ) и ( $P$ ), их охлаждали до комнатной температуры и с фиксированного участка вновь снимали профилограммы при неизменных (ВУ) и (ГУ). Путем сопоставления профилограмм и их автоматической обработки компьютерной программой по изменению высоты микровыступов (рис. 3 а, б) можно определить относительную величину пластической деформации последних, но только на 1-м и 2-м этапах смятия микровыступов, а также путем подсчета относительного значения длин ( $l_1, l_2, l_3$ , см. рис. 3) контактных площадок на выделенном фиксированном участке ( $L$ ), определить относительную или абсолютную величину площади действительного контакта [12].

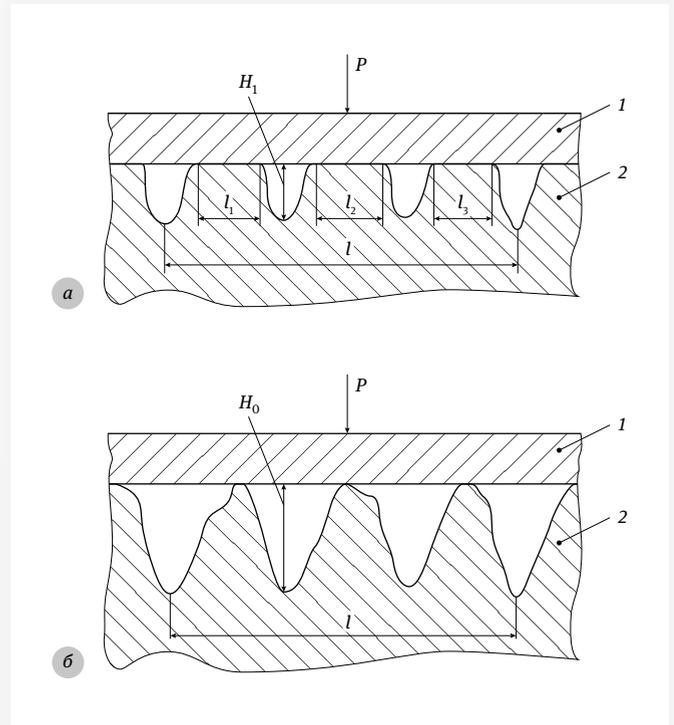
Математическая обработка полученных экспериментальных результатов по оценке влияния ( $P, T, R_2$ ) на формирование микровыступов, пластическую деформацию и образование контакта позволила получить выражение для расчета образующейся площади контакта ( $F, \text{мм}^2$ ), а именно:

$$F = \pi R^2 S, \quad (1)$$

где:  $R$  – радиус образца, мм;  $S$  – относительная ширина контактных площадок (см. рис. 4) и принимающих значения  $0 < S < 1$ .



**Рис. 2.** Схема приспособления для нагружения (а) и измерения микротвердости (б) на поверхности контактных площадок и глубину микровыступа; 1 – шар, 2 – керамическое кольцо, 3 – слюда, 4 – шток, 5 – обойма, 6 – сапфир, 7 – исследуемый образец, 8 – опорная обойма, 9 – опорное основание



**Рис. 3.** Схема измерения длин ( $l$ ) на выделенном участке ( $L$ ):  $H_0$  – исходная высота микровыступов;  $H_1$  – в текущий момент времени;  $l_1, l_2, l_3$  – ширина контактных площадок, мм; 1 – корунд, 2 – металл

Выражение (1) позволяет, зная относительную ширину контактных площадок (определяется по кинетической экспериментально, то есть это значение снимается с экспериментального графика функциональной зависимости  $S = f(T, P, R_2)$  и радиус образца ( $R$ ), рассчитать площадь образовавшегося контакта на любом этапе смятия микровыступов при чистовом выглаживании плоских металлических поверхностей и его сварке давлением с нагревом. В наших экспериментах при обработке контактных поверхностей точением число кольцевых микровыступов ( $n$ ) находится в пределах 130–132, а строганием –  $n = 30–32$ . После несложных преобразований получаем, что вычисленная погрешность определения заштрихованной площади  $F$  (рис. 4 а, б) контакта составляет  $\approx 1\%$ . С применением выражения (1) были рассчитаны действующие ( $\sigma_d$ ) нормальные напряжения в контакте микровыступ – сапфир во всем интервале температур и давлений по известному выражению

$$\sigma_d = P / F, \quad (2)$$

и построены кинетические кривые изменения нормальных и касательных напряжений ( $\tau_d$ ) в каждый фиксированный момент времени.

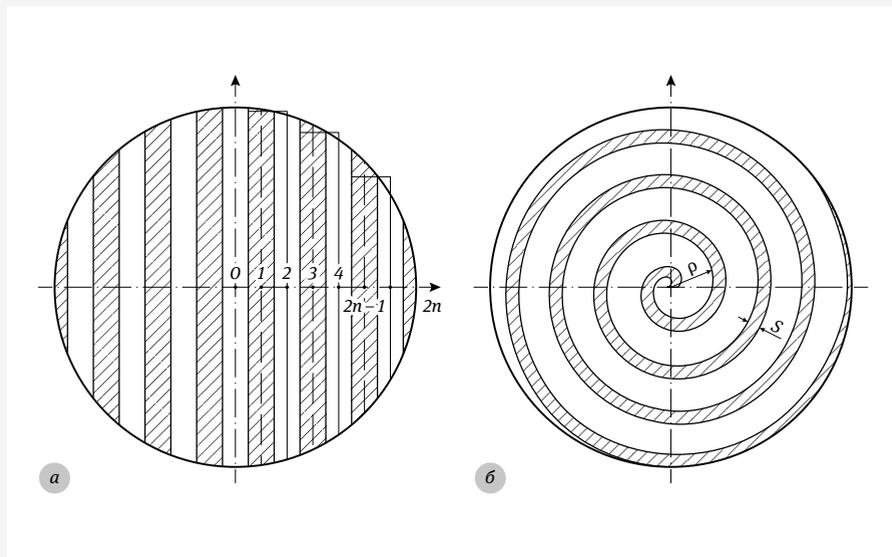


Рис. 4. Схемы расчета площади контакта  $F$ : (а – точение; б – строгание)

### Основное содержание работы

Применение профилографов-профилометров контактного действия для съема информации об изменении топографических характеристик поверхности ограничено физическими возможностями применяемого метода. Важнейшими метрологическими характеристиками методик измерения шероховатости являются [17]:

- $\Delta_z$  – нижний предел измерения высоты микровыступов;
- $\Delta_x, \Delta_y$  – разрешающая способность по полю;
- $v_{\min}$  и  $v_{\max}$  – границы диапазона частот микронеровностей.

Для профилографов, как и для оптических устройств и методов контроля шероховатости, величина  $\Delta_z$  измеряется сотыми долями микрометра, тогда как разрешение по полю  $\Delta_{x,y}$  в десятки раз хуже этого показателя. Такое соотношение может создать видимость большой точности измерения координаты  $Z$  реального профиля по сравнению с координатами  $X$  и  $Y$ . В действительности это не всегда так, вследствие различия условий измерения микровыступов при их смятии на различных этапах кинетической кривой образования контакта и наличия корреляционной связи между  $\Delta_z$  и  $\Delta_{x,y}$ , устанавливаемой соотношением Ингельштамма [18]. Более того, величина  $\Delta_{x,y} \neq 0$  задает не только верхнюю границу измеряемых частот микронеровностей  $v_{\max} = \Delta_{x,y}^{-1}$ , но и приводит к появлению дополнительной систематической погрешности измерения, зависящей не только от класса точности профилографа, но и от особенностей рельефа поверхности и характера его изменения во времени, что имеет место при сварке в твердом состоянии под давлением с нагревом и чистовом выглаживании [15, 16]. Эта составляющая погрешности наиболее существенна

в тех случаях, когда угол  $\alpha$  при вершине микровыступов (рис. 5 а, б) меньше  $90^\circ$ . Оценим возможную величину этой погрешности и покажем, что в отдельных случаях она может быть исключена специальным способом обработки профилограмм.

Рассмотрим линейные однородные микронеровности, создаваемые на исследуемой контактной поверхности при ее обработке резцом треугольного сечения с углом заточки  $\alpha$ . Профиль такой поверхности можно аппроксимировать моделью, показанной на рис. 5 а.

Из геометрических построений легко видеть, что относительная систематическая погрешность профилографирования  $\Delta h/h$  составляет:

$$\Delta h/h = r(1 - \sin \alpha/2) / h \sin \alpha/2 = 4r \sin(\alpha/2)(1 - \sin \alpha/2) / l \sin \alpha, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус острия иглы профилографа ( $r=2$  мкм в нашем случае).

Как видно из соотношения (3), погрешность измерения пропорциональна соотношению  $r/h$  или  $r/l$ , а с уменьшением угла  $\alpha$ , при  $h = \text{const}$ , неограниченно возрастает. Соотношение (3) показывает также частотную зависимость погрешности  $\Delta h/h$ , так как величина  $l^{-1}$  является не чем иным, как числом микронеровностей на единице длины (частотой микронеровностей). Численные значения погрешности измерения профилографом, в соответствии с выражением (3), для

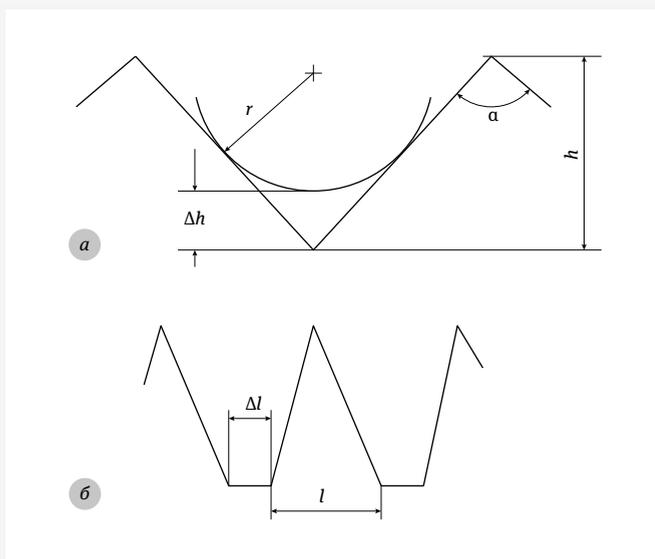


Рис. 5. Схема профиля микровыступов на контактной поверхности

частного случая  $r=2$  мкм и высоты микровыступов  $h=10$  мкм, достигает 3%, 8,5% и 20%, соответственно, для  $\alpha=120^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $60^\circ$ . Фактическая точность измерения может быть выше вследствие скругленности дна впадин между микровыступами, но во всех случаях оценки справедливы для микронеровностей, отстоящих на расстоянии порядка  $\Delta_{x,y}$  или с малыми значениями угла  $\alpha$ .

Рассмотренную погрешность можно исключить специальным способом обработки профилограмм. Эта возможность заложена в самой методике определения площади действительного контакта и величины пластической деформации микровыступов, основанной на сопоставлении профилограмм. Обычно, относительную деформацию микровыступов  $E_m$  находят, сравнивая (см. рис. 2 или 3) среднее значение исходной высоты ( $h_0$ ) микровыступов с их средней высотой ( $h_i$ ) в текущий момент времени ( $t$ ) по формуле:

$$E_m = \{(h_0 - h_i) / h_0\} \times 100\%. \quad (4)$$

Однако расчет по этой формуле относительной деформации микровыступов свариваемых поверхностей при их групповой осадке не учитывает того, что по мере развития процесса происходит изменение их боковых образующих (см. рис. 6), уменьшение угла между ними и сваривание их между собой [8, 9, 12, 18]. Избежать соответствующего возрастания погрешности определения  $E_m$  по формуле (4) можно, используя взаимосвязь между величиной  $E_m$  и коэффициентом несущей части профиля, который численно равен относительной площади действительного контакта  $S$ , определяемой экспериментально по профилограммам путем измерения длин контактных площадок и точность измерения которого в широких пределах не зависит от угла  $\alpha$  при вершине микровыступа.

Действительно, в рамках рассматриваемой модели линейных микровыступов треугольного сечения, становящихся последовательно трапециевидальными и прямоугольными в результате их осадки, воспользуемся условием сохранения массы и объема микровыступов. Это означает, что на всех этапах смятия микровыступов площадь их сечения в плоскости профилографирования остается постоянной. Отсюда следует, что:

$$E_m = S / (1 + S), \quad (5)$$

$$\Delta h / h_0 = 1 / (1 + S). \quad (6)$$

Таким образом, процедуру измерения  $h_i$  для нахождения  $E_m$  можно заменить процедурой измерения с высокой

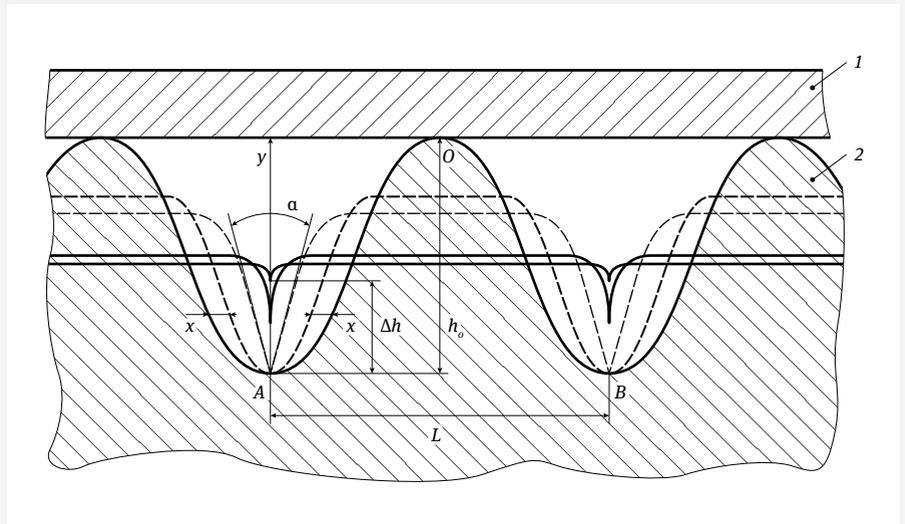


Рис. 6. Схема «кажущегося» подъема нижней точки основания микровыступов на плоской поверхности при их пластической деформации. 1 – корунд, 2 – металл

точностью  $S$ , избежав тем самым неточности контроля глубины впадин, зависящей от угла  $\alpha$  и установленных особенностей и характера смятия микровыступов при их групповой осадке на контактных поверхностях при сварке давлением с нагревом и чистовой отделочной обработке металлических поверхностей плоским сапфировым инструментом [9, 12, 15]. Для модели профиля, учитывающей «плоскостность» дна впадин (рис. 5 б), выражение (5) принимает вид:

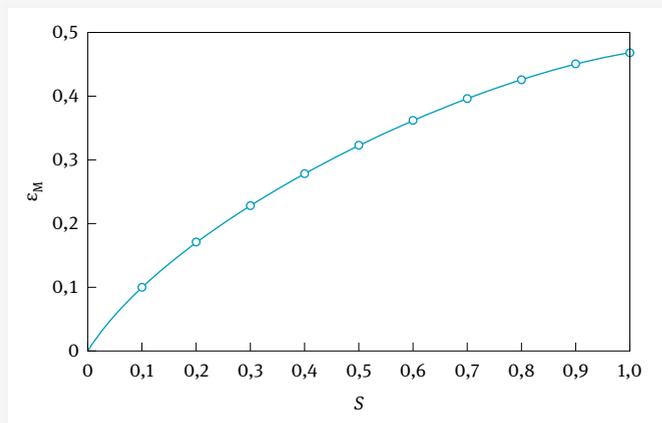
$$E_m = S(1 + \Delta l / l) / [1 + S(1 + \Delta l / l)]. \quad (7)$$

Как следует из анализа выражений (5) и (7), всегда  $S > E_m$ , а при  $S$ , стремящейся к 1,  $E_m$  стремится к 0,5. Тогда как прямые измерения  $h_i$  микровыступов и оценки величины пластической деформации  $E_m$  по выражению (4) приводят к заключению, что  $E_m > S$ . В связи с этим, сопоставлять и анализировать кинетику роста прочности (схватывания) соединения материалов с кинетикой пластической деформации микровыступов при сварке давлением с нагревом не корректно и не позволяет получить объективную оценку процесса [10, 20]. Дифференцируя соотношение (5) и (7) можно найти скорость ( $\dot{E}_m$ ) пластической деформации микровыступов:

- для модели (рис. 5, а)  $\dot{E}_m = \dot{S} / (1 + S)^2$ ; (8)

- для модели (рис. 5, б)  $\dot{E}_m = \dot{S}(1 + \Delta l / l) / [1 + S(1 + \Delta l / l)]^2$ . (9)

Выражения (8) и (9) показывают, что относительная площадь действительного контакта ( $S$ ) возрастает всегда значительно быстрее, чем изменяется величина пластической деформации ( $E_m$ ) микровыступов на контактных поверхностях. Это означает, что кинетическая кривая пластической деформации микровыступов должна всегда располагаться ниже кинетической кривой образования



**Рис. 7.** Графическая взаимосвязь площади действительного контакта ( $S$ ) с величиной относительной пластической деформации ( $E_m$ ) микровыступов

действительного контакта, переходящего в физический по достижении 0,6 от номинального на второй стадии смятия микровыступов [12, 19]. Сопоставлять и анализировать кинетику роста прочности (схватывания) необходимо с кинетикой развития контактных площадок на пластически деформирующихся микровыступах с учетом и на основе четырех этапов смятия микровыступов, развивающихся микронапряжениях 2-го рода (нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$ ), а также развивающихся физико-химических и механических процессов эстафетной передачи деформации из «мягкого» металла в более твердое тело (сапфир) [19]. При этом необходимо учитывать, что размер микровыступа соответствует размеру одного зерна металла. Это означает, что, рассчитывая  $\sigma_d$  на каждой контактной площадке микровыступа, определяем напряжения, компенсированные в объеме зерна, то есть напряжения 2-го рода; путем пересчета по известным формулам определяем величину касательных напряжений 2-го рода, компенсированных в объеме зерна [21, 22]. Получая экспериментальные значения  $S$  и подставляя их в выражение (8), можно рассчитать величину относительной пластической деформации ( $E_m$ ) микровыступов свариваемых поверхностей. На рис. 7 показана графическая взаимосвязь площади действительного контакта ( $S$ ) с величиной относительной пластической деформации ( $E_m$ ) микровыступов при сварке давлением с нагревом и чистовой отделочной обработке сапфиром плоских поверхностей.

### Выводы

Разработанная методика определения  $E_m$  и  $S$  была использована для установления количественных и качественных закономерностей и характера смятия микровыступов на контактных поверхностях металлов при их чистовой отделочной обработке и получения поверхностей с регулируемыми

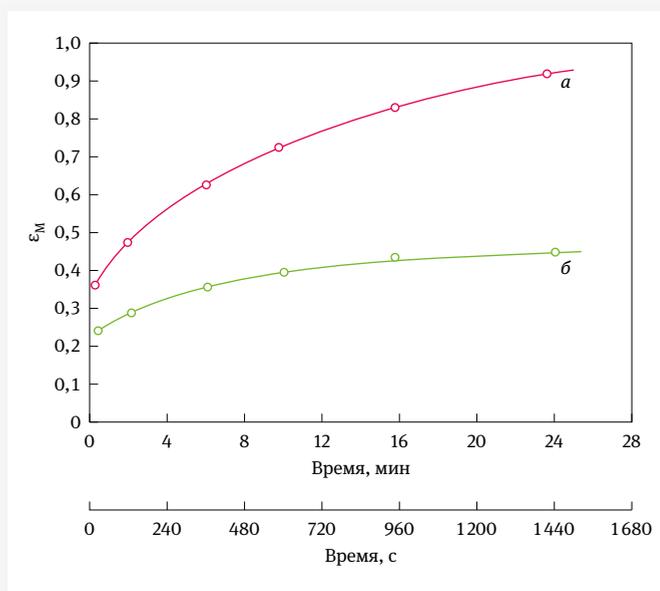
и контролируемыми механическими свойствами, а также при сварке давлением с нагревом разнородных материалов с резко различной сопротивляемостью ползучести. Также данная методика позволяет рассчитать уровень микронапряжений 2-го рода на контактных площадках микровыступов и в объеме.

Проведенный комплекс исследований позволил объяснить природу смещения кинетической кривой роста прочности (развития схватывания) между разнородными материалами и предложить механизм эстафетной передачи деформации от «мягкого» зерна металла в более твердый (сапфир). Кроме того, это позволило провести оценку корректности ранее опубликованных данных других авторов по оценке  $E_m$  по формуле (4), выполненных без учета характера смятия микровыступов на свариваемых поверхностях.

В качестве примера на рис. 8 приведено сопоставление кинетических кривых пластической деформации микровыступов обработки при сварке давлением с нагревом железо-никелевого сплава 50Н (Fe50%, Ni50%), рассчитанных по формуле (4) без учета особенностей смятия микровыступов (кривая *a*) и с учетом особенностей смятия (кривая *б*) по формуле (6) при одних и тех же параметрах сварки и выглаживания.

Подтверждено существенное завышение  $E_m$  при расчете по формуле (4) на основе прямых измерений  $h$ , причем ошибка достигает 100% при  $S \rightarrow 1$  [12].

Принципиальное различие между схемами процесса сварки давлением с нагревом и чистовой отделочной обработки



**Рис. 8.** Сопоставление кинетических кривых пластической деформации микровыступов сплава 50Н, построенных по формуле (4) путем прямого измерения высоты  $h$  микровыступов (кривая *a*), и по формуле (5) с учетом особенностей смятия микровыступов (кривая *б*),  $T_{св} = 1423$  К,  $\sigma_n = 10$  МПа

(выглаживания) состоит в следующем. При выполнении процесса по схеме сварки характер воздействия давления может меняться, но разъединения поверхностей не допускается. То есть процесс сварки ведется непрерывно без поступления в зону образующегося действительного контакта и при достижении 60% от номинального, переходящего в физический контакт, молекул и атомов кислорода в зону контакта не поступает и начавшееся пластическое течение металла поверхностного слоя под действием микронапряжений 2-го рода обеспечивает непрерывную активацию контактных поверхностей и схватывание [12, 23].

В противоположность этому, при выполнении процесса по схеме выглаживания, через определенные промежутки времени, устанавливаемые в соответствии с требованиями конкретного эксперимента и учетом характера смятия микровыступов, происходит разъединение контактных поверхностей металла и сапфирового диска. Таким образом, в этом случае создаются условия для насыщения контактных поверхностей молекулами и атомами кислорода и создаются условия для образования комплекса адсорбции и состояние физического контакта не достигается. Иначе говоря, контактные поверхности сапфира и микровыступов материала после разъединения «отравляются» комплексом адсорбции, что и препятствует достижению физического контакта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Рыкалин Н.Н., Шоршоров М.Х., Красулин Ю.Л.** Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов // Изв. АН СССР. 1965. вып. 1. № 1. С. 20–25. Сер. «Неорганические материалы».
2. **Красулин Ю.Л., Шоршоров М.Х.** О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии // ФИЗХОМ, АН СССР. 1967. № 1. С. 15–18.
3. **Красулин Ю.Л.** Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. М.: Наука, 1971. 120 с.
4. Механика и физика контактного взаимодействия. Сб. трудов под ред. Демкина Н.Б., Калинин. КПИ, вып. 1 – 1975, 165 с.; вып. 2. – 1976, 100 с.
5. **Гаркунов Д.Н.** Эффект безызносности при трении. Научные открытия в триботехнике. М.: Изд. МСХА, 2004. 383 с.
6. **Костецкий Б.И.** Трение, смазка и износ в машинах. Киев: Техника, 1970. 395 с.
7. **Шоршоров М.Х., Красулин Ю.Л.** К расчету оценки режимов сварки давлением // Сварочное производство. 1967. № 7. С. 15–21.
8. **Абрамов В.В., Бычкова З.С., Шоршоров М.Х.** Кинетика топохимической реакции между медью и никелем при сварке в твердой фазе // ФИЗХОМ. 1972. № 4. С. 15–21.
9. **Абрамов В.В.** Кинетика пластической деформации меди и никеля при сварке в твердой фазе // Сварочное производство. 1973. № 2. С. 20–24.
10. **Каракозов Э.С.** Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 263 с.
11. **Абрамов В.В.** Исследование и разработка технологии получения неразъемного соединения некоторых разнородных материалов, применяемых в приборостроении. Канд. диссертация. М.: ВНИИМП, 1971. С. 217.
12. **Абрамов В.В.** Кинетика взаимодействия разнородных материалов в твердом состоянии и разработка совмещенного технологического процесса выглаживания и получения неразъемного соединения при производстве приборов авиационной и электронной техники. Дисс. докт. техн. наук. М.: МАТИ им. К.Э. Циолковского, 1990. 432 с.
13. Рубин и сапфир / Под ред. М.В.Классен-Неклюдовой и Х.С.Багдасарова. М., 1974. 236 с.
14. **Колмогоров Г.Д., Абрамов В.В., Неретин Н.А. и др.** Особенности получения неразъемного соединения монокристаллического сапфира с некоторыми металлами сваркой давлением с подогревом // Электронная техника. 1976. № 8. С. 18–23. Сер. 7.
15. А. С. № 400488. СССР. М., Кл. В 28д 5/00. Способ уплотнения сапфировых окон / Н.В.Урусов, И.В.Бабашов Г.В. Бондаренко и др. 2 с. Бюллетень № 40, 1973.
16. А. С. № 350640. СССР. М., Кл. В 24в 39/00. Способ отделочной обработки / Н.В.Урусов, В.В.Абрамов, В.Н.Стрельников и др. 2 с. Бюллетень № 27, 1972.
17. **Карташов А.И.** Шероховатость поверхности и методы ее измерения. М.: Изд. Стандартов, 1964. 163 с.
18. **Ингельштамм Д.** Принцип оптической неопределенности и его применение к количественной информации, даваемой многолучевыми интерферометрами.
19. **Абрамов В.В., Батищев В.В., Ракунов Ю.П.** О механофизико-химических явлениях на границе раздела твердых тел при термомеханическом воздействии. Волгоград, Вестник ВГАСУ. Вып. 31 (50), ч. 2, Строительные науки, 2013, С. 71–74. Сер.: Строительство и архитектура.
20. **Каракозов Э.С.** Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. С. 272.
21. **Пинегин С.В.** Контактная прочность и сопротивление качению. М.: Машиностроение, 1969. С. 236.
22. **Абрамов В.В., Ракунов Ю.П., Суэтина Т.А., Герасименко В.Б.** Технические основы создания машин и оборудования предприятий строительных материалов. М.: МГАКХИС, Граница, 2009. С. 430.
23. **Абрамов В.В.** Кинетика совмещенных процессов выглаживания и сварки давлением с нагревом разнородных кристаллических материалов с сильно различной сопротивляемостью пластической деформации // ФИЗХОМ. 2024. № 2.

## Авторы

**Абрамов Валерий Васильевич** – доктор технических наук, профессор, НИУ МГСУ, Москва

**Ракунов Юрий Павлович** – кандидат технических наук, доцент, НИУ МГСУ, Москва