

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТА КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ СХВАТЫВАНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук,
А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Митюрёв А.А., 2023

Изучены условия возникновения схватывания поверхностей металлов при статическом контакте и сдвиге. Исследовано влияние механической нагрузки и повышенных температур на процесс образования адгезионного соединения в контакте. Дано описание экспериментальной установки и методики эксперимента. Получены количественные значения прочности адгезионных соединений и проведен теоретический анализ полученных зависимостей. Показано, что относительный сдвиг контактирующих поверхностей влияет как на порог схватывания, так и на величину коэффициента адгезии при данных температуре и нагрузке. При этом значения температур и нагрузок, при которых начинается схватывание, снижаются, а коэффициенты адгезии увеличиваются.

Ключевые слова: металлический контакт, адгезия, схватывание, температура, площадь контакта, контактное электрическое сопротивление.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-14-24

ВВЕДЕНИЕ

Адгезия и адгезионные технологии широко распространены в природе и технике, начиная от аэрокосмической отрасли и заканчивая легкой промышленностью и медициной [1–3]. Большое значение имеет адгезионное взаимодействие тел в трибологии, так как оно является причиной одного из наиболее распространенных и опасных видов изнашивания – адгезионного, а также одной из причин возникновения силы трения между контактирующими телами [4, 5].

В современной технике в связи с тенденцией возрастания удельных энергетических нагрузок растет число контактных соединений, работающих при повышенных температурах в жестких эксплуатационных режимах. В этих условиях увеличивается вероятность образования в контактах адгезионного соединения металлов в твердой фазе, т.е. схватывания. В подвижных соединениях схватывание ведет к возрастанию энергетических потерь, повышенному износу и, как крайний случай, к потере работоспособности из-за возникновения заедания в контакте. В электроконтактных устройствах схватывание ведет к залипанию контактов, что также может привести к аварийной ситуации.

Значительное количество теоретических и экспериментальных работ посвящено исследованию механизма процесса адгезии и схватывания. Результаты исследований и ряд гипотез для объяснения явления представлены в фундаментальных монографиях [6–8], однако единой теории адгезии не разработано до настоящего времени, так что исследования различных аспектов адгезионного контакта остаются актуальными [1, 2, 9].

Цель данного исследования заключалась в изучении адгезии и схватывания конструкционных металлов при повышенных температурах в статическом контакте и при сдвиге для установления влияния схватывания на основные характеристики контакта металлических поверхностей, определяющие его фрикционные свойства, тепло- и электропроводность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Установка для исследования процесса схватывания при повышенных температурах (рис. 1) используется в ходе экспериментального определения характеристик контакта металлических поверхностей при схватывании в статике и при сдвиге.

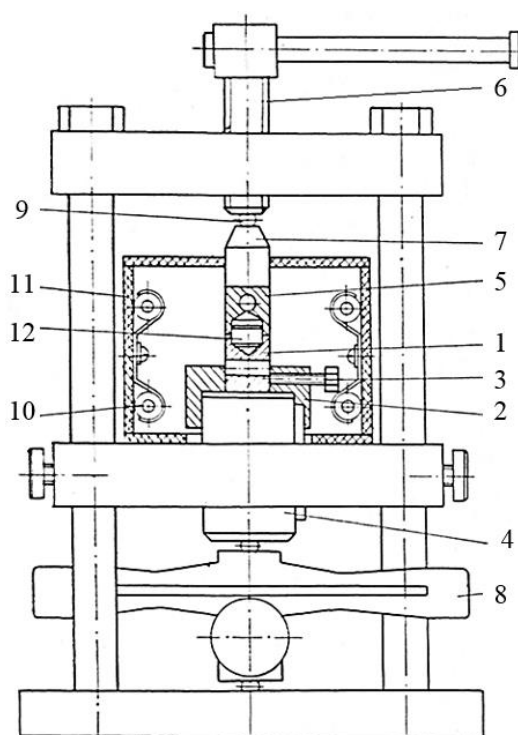


Рис. 1. Схема установки для исследования схватывания металлов при повышенных температурах

Основные узлы установки: система нагружения, узел крепления нижнего образца и нагреватель в изоляционном корпусе. Образцы цилиндрической формы диаметром 20 мм и длиной 25 мм изготавливали точением на токарном станке. Со стороны рабочей торцевой поверхности образца просверлено вдоль оси глухое отверстие диаметром 14 мм для установки в него центрирующей втулки. Образцы контактируют по схеме торцевого трения рабочими поверхностями, имеющими в плане вид колец. В образце также просверлено диаметральное сквозное отверстие, в него вставляется рычаг, с помощью которого осуществляется сдвиг верхнего образца поворотом вокруг вертикальной оси.

Нижний образец 1 укрепляется в оправке 2 и удерживается от поворота вокруг вертикальной оси винтом 3 со стопором. Оправка 2 закреплена на обойме 4 и удерживается от вращения шпонкой. Нагрузка прикладывается к верхнему образцу 5 посредством винта 6 через обойму 7 со шлифованным нижним торцом и измеряется динамометром 8. Верхний образец 5 центрируется шариком 9. Нагрев образцов

производится спиральным нагревателем 10 в изоляционном корпусе 11. При сдвиге образцы центрируются втулкой 12.

Измерение контактного электросопротивления образцов осуществляется методом вольтметра – амперметра по четырехпроводной схеме и производится с помощью цифрового вольтметра постоянного тока и источника постоянного тока. Температура образцов измеряется термометром и хромель-копелевой термопарой, расположенной у контактного стыка.

Рабочие параметры установки:

нормальная нагрузка на образцы 0...20 кН;

номинальная площадь контакта 160 мм²;

интервал рабочих температур 20...450 °С;

рабочий ток нагревателя 0...4 А;

сила тока в измерительной схеме 1...10 А.

Эксперименты проводили по нижеописанной методике.

Торцевые (кольцевые в плане) рабочие поверхности образцов шлифовали на нескольких абразивных порошках с последовательным уменьшением зернистости на притирочной плите для достижения заданной шероховатости поверхности. Шлифованные поверхности обезжиривали полярными и неполярными растворителями, затем насухо протирали.

Для исследования схватывания в статическом контакте устанавливали нижний образец 1 в оправку 2 (см. рис. 1). После установки верхнего образца 5 и обоймы 7 с шариком 9 прикладывали сжимающую контактную нагрузку. Нагревали контактный узел до требуемой температуры в течение 10...20 минут и выдерживали образцы 10 минут. Затем охлаждали образцы 20...30 минут вместе с контактным узлом до комнатной температуры. После этого разгружали образцы, поднимали винт 6 и включали электроизмерительную цепь. Измерения контактного электросопротивления проводили при комнатной температуре. Потом вынимали образцы из обоймы 7 и визуально определяли наличие схватывания. Если образцы схватывались, продолжали эксперимент для определения силы разрыва адгезионных связей при комнатной температуре.

При исследовании схватывания в контакте со сдвигом устанавливали нижний образец 1 в оправку 2 и закрепляли стопорным винтом 3. В полость образца вкладывали направляющую центрирующую втулку 12. После установки верхнего образца 5 и обоймы 7 с шариком 9 прикладывали сжимающую контактную нагрузку. Нагревали контактный узел до требуемой температуры в течение 10...20 минут. Открывали изолирующий корпус 11, не снимая сжимающей нагрузки, рычагом поворачивали верхний образец 5 на небольшой угол вокруг вертикальной оси. Корпус закрывали, контакт нагревали в течение 3...5 минут до требуемой температуры и выдерживали образцы 10 минут. Затем охлаждали образцы 20...30 минут вместе с контактным узлом до комнатной температуры. Разгружали образцы, поднимали винт 6 и включали электроизмерительную цепь. Измерения контактного электросопротивления проводили при комнатной температуре. После этого вынимали образцы из обоймы 2 и визуально определяли наличие схватывания. Если образцы схватывались, продолжали эксперимент для определения силы разрыва адгезионных связей при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование схватывания металлов в статическом контакте. Были исследованы образцы технически чистых металлов различной кристаллической структуры: алюминия, кадмия, меди и сплавов различного химического состава

Вестник Тверского государственного технического университета.

Серия «Технические науки». № 3 (19), 2023

(латуни Л63, титанового сплава ВТ20 и углеродистой стали 45). Испытания проводили на воздухе при температурах от 20 до 400 °С и нормальных нагрузках от 0,5 до 15 кН, что соответствует номинальному давлению в контакте $p_n = N/A_n$ от 3,0 до 90 МПа. На основе результатов эксперимента определяли переходное электрическое сопротивление в зоне контакта, площадь поверхности схватывания и коэффициент адгезии.

Коэффициент адгезии рассчитывали по формуле как отношение усилия разрыва адгезионного соединения, образовавшегося при схватывании поверхностей, к нормальной нагрузке [7]:

$$K = \frac{F}{N}. \quad (1)$$

Удельную прочность образовавшегося адгезионного соединения – напряжение адгезии – рассчитывали по формуле

$$\sigma_A = \frac{F}{A_r} = \frac{F}{N} H, \quad (2)$$

где F – усилие разрыва соединения; N – нормальная сжимающая нагрузка; A_r – расчетная фактическая площадь контакта; H – твердость при температуре контактирования.

Твердость индентирования исследованных материалов при повышенных температурах измеряли алмазным коническим индентором с углом при вершине 120° согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002). Для исследованных материалов значения твердости при температурах эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. Твердость исследованных материалов H , МПа, при различных температурах

Материал	Температура, °С				
	20	100	200	300	400
Алюминий	310	260	205	157	110
Медь	800	700	580	463	354
Кадмий	280	95	45	26	–
Титан ВТ20	2 400	1 900	1 300	1 070	950
Латунь Л63	690	650	590	500	480
Сталь 45	1 790	1 740	1 700	1 650	1 610

После разрыва образцов методом планиметрирования по увеличенным фотографиям поверхностей контакта определяли площадь поверхности схватывания, т.е. визуально определяемую область контакта, по которой происходило схватывание поверхностей. Практически эта область близка к контурной площади контакта, на которой группируются пятна фактического контакта. В экспериментах были определены необходимые условия образования адгезионных соединений: температура и контактная нагрузка. Для исследованных металлов они оказались следующими.

Медь. Схватывание медных образцов в статическом контакте начинается при температуре 300 °С, что по гомологической шкале соответствует температуре $\theta = T/T_{пл} = 0,42$. Образовавшиеся после контактирования при 200 °С соединения разваливаются при приложении минимальной разрывающей нагрузки. При более низких температурах не происходит образования адгезионного соединения. На поверхности контакта после его разъединения можно различить три зоны. Поверхность первой покрыта темно-фиолетовой окисной пленкой (цвет пленки меняется в зависимости от ее толщины, на которую влияет температура эксперимента). По этим площадкам контактирование не происходит. Ближе к центру кольца расположена зона, покрытая более тонкой окисной пленкой. Здесь образцы достаточно плотно прилегают друг к другу, что затрудняет окисление контактирующих поверхностей. Однако

схватывания на этих площадках также не происходит. В центре номинальных площадок контактирования располагается третья зона – области схватывания, где группируются фактические площадки контакта, на которых идет образование адгезионного соединения. Эти поверхности имеют цвет свежезачищенной меди, т.е. не покрыты окисными пленками. На образцах, которые испытывались при высоких температурах и контактных нагрузках, когда происходило интенсивное схватывание, в микроскоп наблюдается мелкокристаллическая структура меди на поверхности разрыва соединения.

При нормальных нагрузках 0,5 и 1,0 кН и температуре 300 °С схватывания не происходит, оно начинается при нагрузке 2,5 кН, что соответствует номинальному давлению $p_n = 15$ МПа (3,2 % от твердости меди при этой температуре).

При 400 °С ($\theta = 0,5$) схватывание поверхностей начинается с контактной нагрузки 0,5 кН ($p_n = 3$ МПа, или 0,85 % от твердости при этой температуре).

Прочность адгезионного соединения увеличивается с ростом сжимающей контактной нагрузки при образовании соединения. Зависимость удельного усилия разрыва соединения $\sigma_n = F/A_n$ от нагрузки при температуре 400 °С для медных образцов показана на рис. 2.

Зависимость коэффициента адгезии от величины контактной нагрузки приведена на рис. 3.

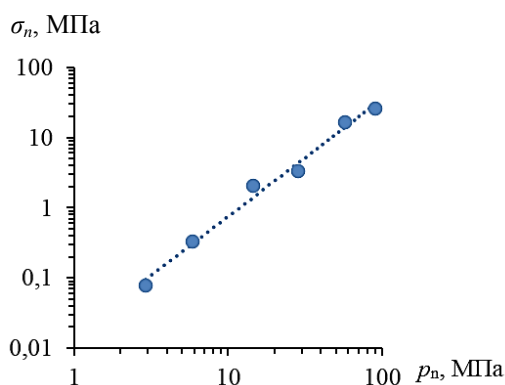


Рис. 2. Зависимость удельного усилия разрыва адгезионного соединения от номинального контактного давления

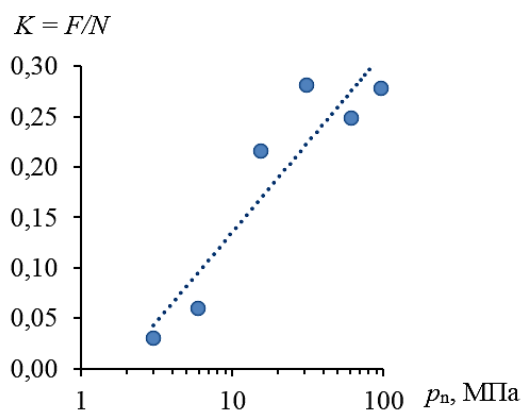


Рис. 3. Зависимость коэффициента адгезии от номинального контактного давления

Как видно из рис. 2 и 3, прочность соединения растет с увеличением усилия сжатия контакта, т.е. контактное давление, как и температура контакта, является фактором, активирующим схватывание поверхностей.

Выразим нагрузку разрушения адгезионного соединения (F) и усилие сжатия (N) через фактическую площадь контакта:

$$F \approx \sigma_n A_r; \quad (3)$$

$$N \approx H A_r, \quad (4)$$

где σ_n – удельное усилие разрыва адгезионного соединения; H – твердость материала.

Твердость, как известно, связана с пределом текучести материала σ_s зависимостью

$$H \approx C \sigma_s, \quad (5)$$

где коэффициент $C \approx 3$.

Таким образом, если предположить, что максимальная прочность адгезионного соединения на фактическом пятне контакта близка к пределу текучести материала в объеме, то, согласно формулам (3)–(5), при развитом пластическом контакте, т.е. при больших контактных нагрузках, значение коэффициента адгезии $K = \frac{F}{N} = \frac{\sigma_n}{H}$ должно стремиться к величине 0,3, что соответствует рис. 3.

Очевидно, увеличению прочности адгезионного соединения способствует увеличение площади контакта, на которой происходит схватывание и которая зависит как от нормальной нагрузки на контакте, так и от изменения твердости материала с температурой. График зависимости площади схватывания от нагрузки для контакта медных образцов в статике при 400 °С приведен на рис. 4.

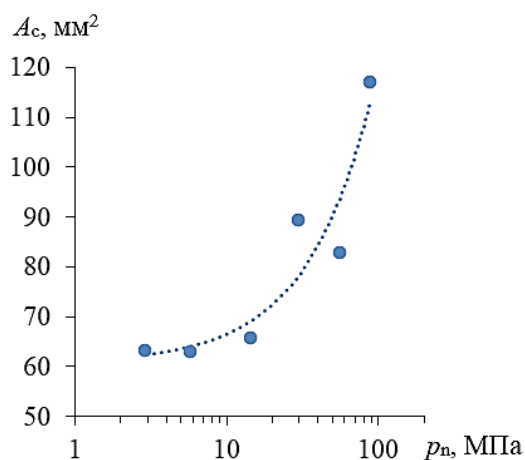


Рис. 4. Зависимость площади схватывания от номинального давления

Зависимость контактного электрического сопротивления от нагрузки адгезионного соединения, полученного в экспериментах при температурах контакта 300 и 400 °С, показана на рис. 5. Несмотря на то, что между контактным электросопротивлением и фактической площадью контакта нет прямой пропорциональности, очевидно, что большей величине площади контакта соответствует меньшая величина электросопротивления. Таким образом, рис. 5 подтверждает увеличение площади адгезии с ростом температуры.

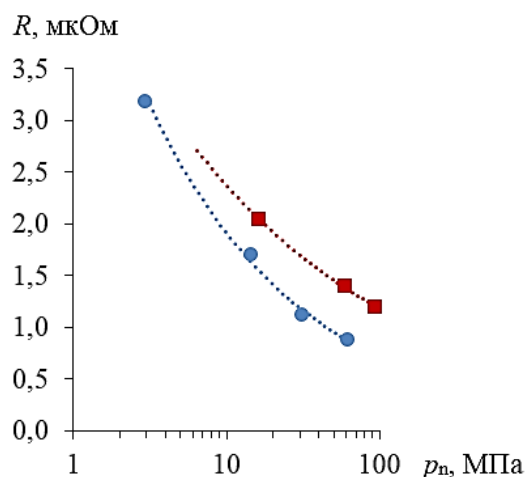


Рис. 5. Зависимость контактного электрического сопротивления от номинального давления: верхняя линия – температура 300 °С; нижняя – 400 °С; материал образцов – медь

Алюминий. Алюминиевые образцы при контактировании не схватываются до температуры 400 °С, что соответствует температуре по гомологической шкале $\theta = 0,72$. При указанной температуре схватывание начинается с нагрузки 1 кН, что соответствует номинальному давлению 6 МПа (5,5 % от твердости). При этом коэффициент адгезии достаточно мал и равен 0,01...0,02 даже при площади схватывания, практически равной номинальной площади контакта. Невысокая адгезия поверхностей при развитой площади контактирования объясняется наличием на контактных поверхностях окисных пленок, препятствующих образованию пятен металлического контакта. Это предположение подтверждается высокими значениями контактного электрического сопротивления – порядка 0,3...1,5 мОм.

В исследованном интервале температур и нагрузок при статическом контактировании не наблюдалось схватывания стальных, латунных и титановых образцов. Данный факт связан с высокой твердостью указанных материалов, слабой ее зависимостью от температуры в исследованном интервале температур и, соответственно, с неразвитостью пластических деформаций в зоне контакта. Эти результаты согласуются с современными взглядами на механизм образования адгезионных соединений в контакте металлов [7, 8]. Схватыванию титановых образцов, кроме того, препятствуют прочные окисные пленки на поверхности металла, не разрушающиеся при статическом контакте.

Исследование схватывания металлов при сдвиге контакта

Относительный сдвиг образцов является фактором, интенсифицирующим схватывание в контакте металлических материалов. Причины могут быть следующие: развитие пластической деформации и увеличение площади фактического контакта; разрушение окисных пленок и увеличение относительной доли чисто металлического контакта на пятнах фактического контакта; снижение энергетического барьера схватывания при действии касательных напряжений.

Как и в случае статического контакта, на поверхности контактирования можно выделить три зоны. Две зоны – сильно и слабо окисленные – в случае сдвига аналогичны подобным зонам при статическом контакте, однако их границы менее выражены. В третьей зоне отчетливо наблюдаются следы схватывания. Под микроскопом хорошо видны вырывы и следы переноса материала.

Относительный сдвиг поверхностей влияет как на порог схватывания, так и на величину коэффициента адгезии при данных температуре и нагрузке. Значения температур и нагрузок, при которых начинается схватывание, снижаются, а коэффициенты адгезии увеличиваются. Во время сдвига также происходит схватывание материалов, адгезионное соединение которых отсутствовало при статическом контакте.

Схватывание медных образцов при сдвиге начинается в условиях комнатной температуры, однако не во всех экспериментах, так что разброс данных в этом случае большой. Интенсивное разрушение окисных пленок на поверхности алюминиевых образцов ведет к началу схватывания уже при температурах 20...100 °С. Схватывание более твердых материалов – титана и стали 45 – начинается при 200 °С. Латунь схватывается при 400 °С.

Зависимости усилия разрыва соединения от температуры контакта для исследованных материалов приведены на рис. 6.

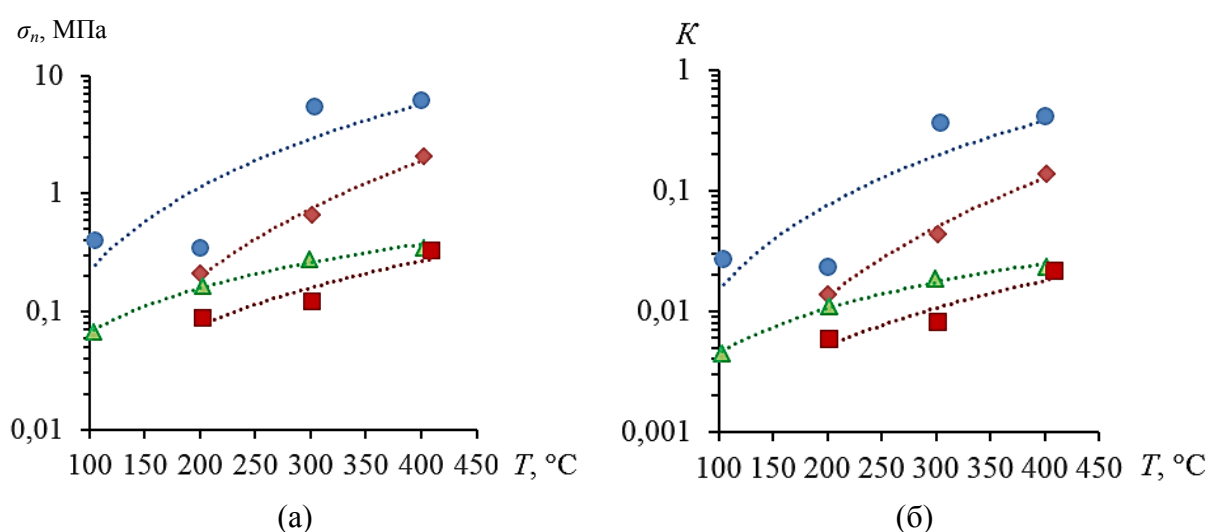


Рис. 6. Зависимость прочности адгезионного соединения (а) и коэффициента адгезии (б) от температуры при сдвиге поверхностей:
 ● – медь; ◆ – титан; ▲ – алюминий; ■ – сталь 45

При одних и тех же температуре и нагрузке наибольшей склонностью к схватыванию отличается медь, наименьшей – сталь 45. Схватывание образцов из кадмия не происходит ни при статическом контакте, ни при сдвиге, несмотря на невысокую твердость этого металла, а следовательно, и большую площадь фактического касания при контактировании. Это подтверждает теоретические представления [7], согласно которым металлы с гранцентрированной плотноупакованной решеткой имеют меньшую склонность к схватыванию.

Многочисленные исследования процессов адгезии и схватывания металлов свидетельствуют об их термически активируемом характере. В частности, одним из механизмов адгезии считается диффузионный. В связи с этим рассмотрим зависимость адгезионной прочности металлического контакта от температуры. В координатах $\ln\sigma_A - 1/T$ данная зависимость имеет вид прямой, наклон которой характеризует энергию активации процесса (рис. 7). Определенные на основании данных рис. 7 значения энергии активации E_A для трех металлов приведены в табл. 2. Эти значения существенно меньше, чем у энергии активации самодиффузии, типичные значения которой равны 15...20 $RT_{пл}$, и наиболее близки к энергии поверхностной диффузии E_s ,

типичные значения которой (в зависимости от механизма диффузии) равны $4...6 RT_{пл}$ [10]. Согласно работе [11], энергия активации поверхностной диффузии составляет $5...20\%$ от теплоты адсорбции. Если принять, что типичная теплота химической адсорбции $1...10$ эВ, то величина энергии активации поверхностной диффузии $E_s = 0,05...2$ эВ, что соответствует примерно $5...200$ кДж/моль.

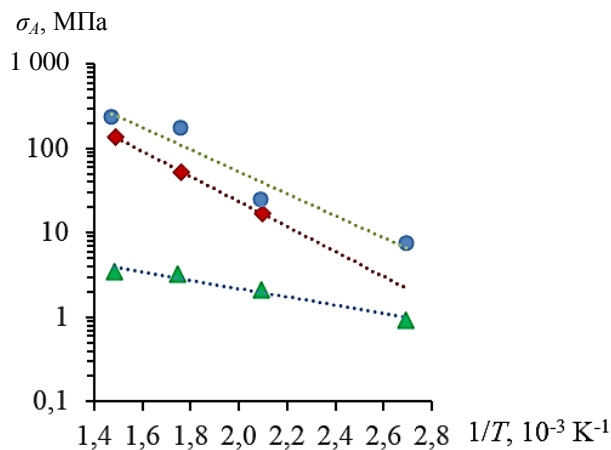


Рис. 7. Зависимость напряжения адгезии от обратной температуры:
 ● – медь; ◆ – титан; ▲ – алюминий

Таблица 2. Значения энергии активации, кДж/моль

Металл	Адгезия (эксперимент)	Поверхностная диффузия [11]
Алюминий	9,5	≈ 46
Титан	28,0	–
Медь	28,3	30...80

На рис. 8 приведены значения контактного электросопротивления разгруженного контакта образцов в зависимости от фактической площади контакта как для статического контакта, так и для контакта при сдвиге образцов. Фактическую площадь рассчитывали по формуле (4) для пластического контакта, используя экспериментальные значения нагрузок сдавливания образцов и твердости при температуре схватывания. Весь массив экспериментальных данных хорошо описывается единой степенной аппроксимирующей зависимостью (показана пунктиром на рис. 8) при высоком значении коэффициента корреляции $R = 0,94$ на уровне значимости $p < 10^{-4}$. Таким образом, величина контактного электросопротивления может служить косвенным индикатором как абсолютных значений, так и изменения фактической площади контакта, несмотря на то, что контактное электросопротивление определяется не суммой площадей пятен фактического контакта A_r , а их суммарным периметром [12]. Эксперименты показали также тесную отрицательную корреляционную связь между контактным электросопротивлением и коэффициентом адгезии с коэффициентом корреляции $R = 0,85$ на уровне значимости $p < 0,01$.

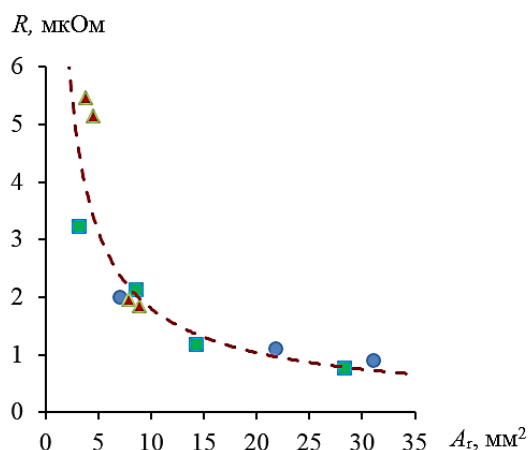


Рис. 8. Зависимость контактного электросопротивления от фактической площади контакта:
 ● – медь, 300 °C; ■ – медь, 400 °C; ▲ – медь при сдвиге;
 пунктир – обобщенная корреляционная зависимость

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае контакта металлических (не ювенильных) поверхностей на воздухе основным фактором, влияющим на прочность адгезионного соединения в статическом контакте металлических деталей и при их относительном сдвиге, является состояние их поверхностей, а именно наличие и прочность оксидных и других пленок. Необходимое условие образования адгезионного соединения – пластическая деформация неровностей шероховатости контактирующих поверхностей, которая не только обеспечивает разрушение поверхностных пленок, но и способствует формированию достаточно большой площади фактического контакта деталей. Следствием этого условия является влияние температуры, твердости материалов контактирующих деталей и нагрузки формирования адгезионного соединения. При упругом характере деформации шероховатого слоя поверхностные пленки не разрушаются, что исключает образование в контакте прочных металлических связей, а слабые ван-дер-ваальсовы связи будут разрушены при упругом восстановлении материала после снятия контактной нагрузки. Имеет значение также кристаллическое строение металлов контактирующих деталей, от которого зависит степень согласованности (или разориентации) кристаллических решеток контактирующих металлов [13].

Качественным индикатором наличия и степени разрушения поверхностных пленок в контакте является контактное электросопротивление. Результаты экспериментов показали тесную корреляцию контактного сопротивления с коэффициентом адгезии. Достоинства контактного электросопротивления как диагностического инструмента: его относительная доступность, простота регистрации и обработки выходной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adhesive Bonding / W. Brockmann [et al.]. Weinheim: Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA. 2005. 414 p.
2. Handbook of Adhesion Technology / ed. by L.F.M. da Silva, A. Öchsner, R. Adams. Springer International Publishing AG. 2018. 1806 p.
3. Handbook of Adhesive Technology / ed. by A. Pizzi, K.L. Mittal. Boca Raton: CRC Press. 2018. 644 p.

4. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит. 2013. 352 с.
5. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О ДМТ-модели дискретного адгезионного контакта // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 5–15.
6. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука. 1973. 280 с.
7. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. М.: Машиностроение. 1986. 359 с.
8. Семенов А.П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах. М.: Наука. 1972. 160 с.
9. The mechanics of adhesion / ed. by D.A. Dillard, A.V. Pocius. Amsterdam e.a.: Elsevier. 2002. 790 p.
10. Antczak G., Ehrlich G. Surface Diffusion: Metals, Metal Atoms, and Clusters. Cambridge e.a.: Cambridge University Press. 2010. 758 p.
11. Введение в физику поверхности / К. Оура [и др.]. М.: Наука. 2006. 490 с.
12. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект. 2008. 560 с.
13. Шпеньков Г.П. Физикохимия трения. Минск: Университетское. 1991. 396 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Митюрёв А.А. Исследование контакта конструкционных металлов в условиях схватывания при повышенных температурах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 14–24.

STUDYING THE CONTACT OF CONSTRUCTIONAL METALS UNDER THE CONDITIONS OF SEIZURE AT ELEVATED TEMPERATURES

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., A.F. GUSEV, Cand. Sc., A.A. MITYUREV, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: iz2v2@mail.ru

The conditions for the occurrence of seizure of metal surfaces under static contact and shear are studied. The effect of mechanical load and elevated temperatures on the process of formation of an adhesive joint in a contact has been studied. The description of experimental device and experimental technique is given. Quantitative values of the strength of adhesive joints are obtained and a theoretical analysis of the obtained dependences is carried out. It is shown that the shear of the contacting surfaces affects both the “seizure threshold” and the value of the adhesion coefficient at a given temperature and load. At that the values of temperatures and loads of seizure begining decrease, and the adhesion coefficients increase.

Keywords: metal contact, adhesion, seizure, temperature, contact area, contact electrical resistance.

Поступила в редакцию/received: 27.02.2023; после рецензирования/ revised: 23.03.2023;
принята/accepted: 15.04.2023