

ПРИМЕНЕНИЕ КЕРМЕТОВ В ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЕ С УЧЕТОМ ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Л.Ш. Шустер, Раф.Ф. Мамлеев, Руст.Ф. Мамлеев, Р.Р. Камалетдинова

В работе установлены закономерности влияния состава керамико-металлических материалов, давления и температуры на характеристики адгезионного взаимодействия при трении. Показано, что улучшение триботехнических характеристик рассмотренных материалов может быть связано с уменьшением пластичности и с повышением энергии активации вязкого течения материала, формирующегося на фрикционном контакте. Установлено, что применение в шаровых крапах керамико-металлических материалов на основе карбида титана TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Л вместо литейных жаропрочных сплавов на никелевой основе ЖС6У и ВЖЛ14Н может повысить несущую способность подвижного фрикционного контакта в 1,2-2 раза и уменьшить молекулярную составляющую коэффициента трения в 1,5-2 раза. При этом повышение температуры до 600 °С не приводит к значительному снижению несущей способности контакта.

Ключевые слова: керамико-металлические материалы, контактное давление, прочность на срез, коэффициент трения, коэффициент упрочнения.

CERMETS USING FOR LOCKING FITTINGS CONSIDERING THEIR TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS

L.Sh. Shuster, Raf.F. Mamleyev, Rust.F. Mamleyev, R.R. Kamaletdinova

In the paper there has being determined influence of the cermet composition, pressure and temperature on adhesive interaction characteristics under friction. Results of the work demonstrate, that enhancement of the cermet tribotechnical parameters might be related with decreasing plasticity and increasing the viscous flow activation energy in the arising friction contact zone.

It was found that using titanium carbide-based cermets TiC-ЖС6У and TiC-ВЖЛ14Н in ball cocks instead of the foundry heat-resistant nickel-based alloys ЖС6У and ВЖЛ14Н can increase the carrying capacity of a movable friction contact in 1,2–2 and decrease the molecular component of friction coefficient in 1,5–2. At the same time, when temperature increases up to 600 °C, carrying capacity of the contact does not significantly decrease.

Keywords: cermets, contact pressure, shear strength, coefficient of friction, coefficient of hardening.

Введение

В последнее десятилетие в трубопроводных системах во всех странах мира, включая Россию, традиционная запорно-регулирующая арматура (задвижки, запорные клапаны) активно вытесняется шаровыми кранами, характеризующимися меньшим гидросопротивлением, большей компактностью, быстродействием, надежностью, большим ресурсом, а также относительной простотой в изготовлении. Значительная часть такой арматуры используется в нефтепереработке и нефтедобыче (крекинг и гидрокрекинг нефти: абразивная и агрессивная среда с температурами до 500–600 °С), в энергетике (тепловые электростанции: пере-

гретый пар до 500–600 °С), в горно-обогательном производстве (транспортировка абразивно-содержащей пульпы) и др.

Одним из путей повышения технико-эксплуатационных характеристик шаровых кранов (жаропрочности, коррозионной стойкости, износостойкости и т.п.) является использование в их производстве керамико-металлических материалов (керметов), относящихся к классу композитов и сочетающих положительные свойства керамики и металлической связки. По твердости и износостойкости они сопоставимы с керамикой, но в отличие от нее обладают более высокой стойкостью к термическим и механическим ударам, характеризуются большей

простотой технологического процесса получения изделия [1].

Важной технической характеристикой шарового крана и другой запорной арматуры является усилие на поворотном валу при открытии и закрытии затворного узла. Оно оказывает определяющее влияние на эксплуатационные свойства арматуры: энергозатраты привода, время срабатывания, интенсивность износа и долговечность, надежность и т.п.

Усилия «открытия – закрытия» зависят не только от габаритных размеров, но и от триботехнических характеристик (коэффициента трения, адгезии и др.) трущейся пары «шаровой затвор – седло». Однако в научно-технической литературе [2–6] практически отсутствуют сведения по этому вопросу. До настоящего времени не выявлены обобщенные закономерности влияния твердой основы, в том числе из карбида титана TiC, на функциональные свойства керметов при трении в различных условиях нагружения, что сдерживает их эффективное применение в запорной арматуре.

Целью данной работы является установление закономерностей влияния состава керамико-металлических материалов, давления и температуры на характеристики адгезионного взаимодействия при трении и рассмотрение возможности повышения эффективности работы шаровых кранов путем замены литейных жаропрочных сплавов на никелевой основе ЖС6У и ВЖЛ14Н на керметы TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н.

Расчетные зависимости

Зона фактического контакта трущихся тел обладает специфическими, только ей присущими свойствами, в общем случае отличными от свойств материалов этих тел, рассматриваемых отдельно, вне контакта при трении [7]. Поэтому раздельное изучение свойств трущихся тел хотя и позволяет качественно судить о свойствах зоны их контакта, однако не может дать адекватной количественной оценки этих свойств при различных условиях нагружения. Необходима непосредственная оценка фрикционных свойств контакта. Только она может коррелировать с основными факторами трения и изнашивания.

Из работы [7] известно, что определяющую роль в формировании фактического контакта в процессе трения и изнашивания играет прочность на срез τ_n адгезионных связей, возникающих на поверхностях трения в результате межатомных и межмолекулярных взаимодей-

ствий. Рядом исследователей предпринимались попытки вычислить значение τ_n с учетом температуры и давления на основании лишь теоретического анализа. И кинетическая теория прочности твердых тел С.Н. Журкова [8], и теория металлов Я.И. Френкеля [9], и гидродинамическая аналогия [10] устанавливают линейный характер зависимости величины τ_n от контактного давления p_r :

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \cdot p_r; \quad (1)$$

$$\tau_0 = C_1 \left(1 + \frac{E_b}{R \cdot \Theta} \right); \quad (2)$$

$$\beta = \frac{C_1 \cdot \Delta A}{R \cdot \Theta}, \quad (3)$$

где τ_0 – прочность адгезионных связей на срез при отсутствии контактного давления; β – коэффициент упрочнения адгезионных связей; C_1 – константа; R – постоянная Больцмана; Θ – температура контакта; E_b – энергия активации вязкого течения фрикционного контакта; ΔA – приращение объема зоны контакта, связанное с необходимостью образования некоторого зазора для разрыва образовавшихся связей и зависящее от пластичности материала в этой зоне.

Изменение температуры контакта приводит к изменению величины τ_0 (2), коэффициента упрочнения адгезионных связей β (3), а также – в условиях пластического контакта – предельного давления p_m , связанного с твердостью более мягкого материала из контактирующих тел фрикционной пары.

Из приведенных выражений видно, что величина прочности адгезионных связей на срез τ_n зависит не только от контактного давления p_r , но и от пластичности материала фрикционного контакта, энергии активации его вязкого течения, а также от температуры, которая оказывает как прямое, так и косвенное воздействие (через изменение величины ΔA) на рассматриваемые параметры.

Однако использовать выражения (1) – (3) для расчета величины τ_n применительно к реальным условиям контактирования и трения тел из поликристаллических металлов в настоящее время не представляется возможным, главным образом, в виду отсутствия достоверных данных о характеристиках зоны контакта E_b , ΔA и C_1 .

Поэтому в данной работе для оценки триботехнических параметров использовали экспериментальные исследования.

Методика исследования

Изучение триботехнических характеристик скользящего контакта проводили в основном на керметах TiC–ЖС6У и TiC–ВЖЛ14Н с различным содержанием карбида титана. Для сравнения исследовали трибоконтакт с жаропрочным сплавом ЖС6У и нержавеющей сталью 12Х18Н10Т, которые применяются в трубопроводной арматуре [5]. Материалы для образцов и инденторов вырезали непосредственно из шара и седла, изготовленных по заводской технологии.

Для проведения исследований адгезионного взаимодействия трущихся поверхностей применяли установку [11], в которой реализована физическая модель, в первом приближении отражающая реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте, в том числе для тяжело нагруженных трибосопряжений машин и механизмов. Согласно этой модели, сферический индентор (имитирующий единичную неровность пятна касания трущихся твердых тел), сдавленный двумя плоско-параллельными образцами, имеющими высокую точность и чистоту контактирующих поверхностей, вращается под нагрузкой вокруг собственной оси. Сила $F_{\text{экс}}$, необходимая для вращения индентора, связана главным образом со сдвиговой прочностью τ_n адгезионных связей. Установка позволяет осуществлять нагрев зоны контакта и обеспечить характерное распределение температуры по глубине контактирующих тел.

Для определения зависимости прочности адгезионных связей на срез τ_n от контактного давления p_r , необходимо знать не только действующие силы, но и изменяющиеся площади касания сферического индентора и плоского образца. Эти площади при ступенчато возрастающей нагрузке можно определить только расчетным путем со значительными погрешностями. Эти погрешности возникают из-за отсутствия достоверных сведений о физико-механических свойствах приконтактных слоев керметов, неизвестности значений коэффициента трения и влияния на него давления и т.д.

Поэтому для определения зависимости $\tau_n(p_r)$ на подвижном фрикционном контакте использовали метод постепенно снижающихся нагрузок: от максимальных, соответствующих пластическим деформациям на контакте, до минимально возможных по точности измерительных приборов.

Суммарную массу разновесок M выбирали такой, чтобы в начале каждого опыта в месте касания индентора и образца создавался пластический контакт с радиусом отпечатка $r_{\text{отп}}$. По нему в дальнейшем определяли площадь контакта пары трения. Полагали, что при уменьшении нагрузки $N_i = M_i g$ ($i \geq 5$) величина площади контакта исследуемой пары трения практически не изменяется, так как упругим восстановлением отпечатка можно пренебречь в связи с распространением пластической деформации на значительную глубину и уменьшением упругости контактирующих материалов при повышенной температуре. Фиксируемые значения τ_n определяли из соотношения [12]:

$$\tau_{ni} = 0,75 \cdot \frac{F_{\text{экс}i} \cdot R_{\text{экс}}}{\pi r_{\text{отп}}^3}, \quad i = 1, \dots, 5, \quad (4)$$

где $F_{\text{экс}i}$ – окружная сила, приводящая во вращение индентор и соответствующая нагрузке N_i ; $R_{\text{экс}}$ – радиус диска, в котором закреплялся индентор; $r_{\text{отп}}$ – радиус отпечатка (лунки) на образцах.

Из-за малых размеров лунки полагали, что контактные давления, действующие на поверхность сферы, постоянны и равны [12]:

$$p_{ri} = \frac{N_i}{\pi \cdot r_{\text{отп}}^2}. \quad (5)$$

По формулам (4) и (5) вычисляли также предельные значения τ_{nn} и p_{rn} , соответствующие пластическому контакту, т.е. начальной суммарной массе разновесок.

Адгезионную (молекулярную) составляющую коэффициента трения f_t , соответствующую пластическому контакту, вычисляли по формуле [12]:

$$f_t = \frac{\tau_{nn}}{p_{rn}} = 0,75 \cdot \frac{F_{\text{экс}} \cdot R_{\text{экс}}}{Mg \cdot r_{\text{отп}}}. \quad (6)$$

Образцы для исследований представляли собой диски Ø 20–25 мм и толщиной 5–7 мм, инденторы – цилиндры Ø 5 мм со сферическими торцами ($R_{\text{сф}} = 2,5$ мм). Исследуемые поверхности имели шероховатость $R_a = 0,2\text{--}0,4$ мкм.

Как показали исследования, достоверные данные о величине τ_n (при различных температурах и давлениях) получаются при двух- или трехкратном повторении эксперимента; при этом вероятное отклонение не превышает 5–8 %.

Анализ полученных результатов

Для всех исследованных пар трения зависимость прочности адгезионных связей на срез τ_n от контактного давления p_r на контакте в исследованном диапазоне температур (рис. 1–3) имеет прямо пропорциональный характер и описывается биномиальной функцией (1).

При этом коэффициент регрессии и свободный член регрессии определяли, соответственно, из следующих выражений [13]:

$$\beta = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^5 p_{ri} \cdot \tau_{ni} - \sum_{i=1}^5 p_{ri} \cdot \sum_{i=1}^5 \tau_{ni}}{m \cdot \sum_{i=1}^5 p_{ri}^2 - (\sum_{i=1}^5 p_{ri})^2}, \quad (7)$$

$$\tau_0 = \frac{\sum_{i=1}^5 \tau_{ni} - \beta \cdot \sum_{i=1}^5 p_{ri}}{m}, \quad (8)$$

где m – число опытов (в данном случае 3); i – порядковый номер наблюдения в каждом опыте.

Выборочный коэффициент r_k , характеризующий силу исследуемых связей, вычислялся по найденному значению коэффициента регрессии [13]:

$$r_k = \beta \cdot \frac{m \cdot \sum_{i=1}^5 p_{ri}^2 - (\sum_{i=1}^5 p_{ri})^2}{m \cdot \sum_{i=1}^5 \tau_{ni}^2 - (\sum_{i=1}^5 \tau_{ni})^2}. \quad (9)$$

Расчеты показали, что выборочный коэффициент корреляции во всех опытах был в пределах 0,97–0,985, что указывает на наличие устойчивой функциональной базы.

Как показали исследования, материалы и температура контакта оказывают существенное влияние на фрикционные параметры τ_0 и β (табл. 1–3).

На рис. 4–6 представлены результаты адгезионных исследований (p_m , τ_{nn} и f_r), полученные в экстремальных условиях нагружения (при вырожденном за счет релаксации пластическом контакте [7, 14]). Маркеры на линиях соответствуют экспериментальным данным.

Представленные результаты (см. рис. 4–6) свидетельствуют о том, что зависимость прочности адгезионных связей τ_{nn} от температуры Θ для всех пар трения носит экстремальный характер с максимумом при $\Theta = 150$ – 300 °С. Причем, для контртела из ЖС6У (см. рис. 5) этот экстремум более ярко выражен.

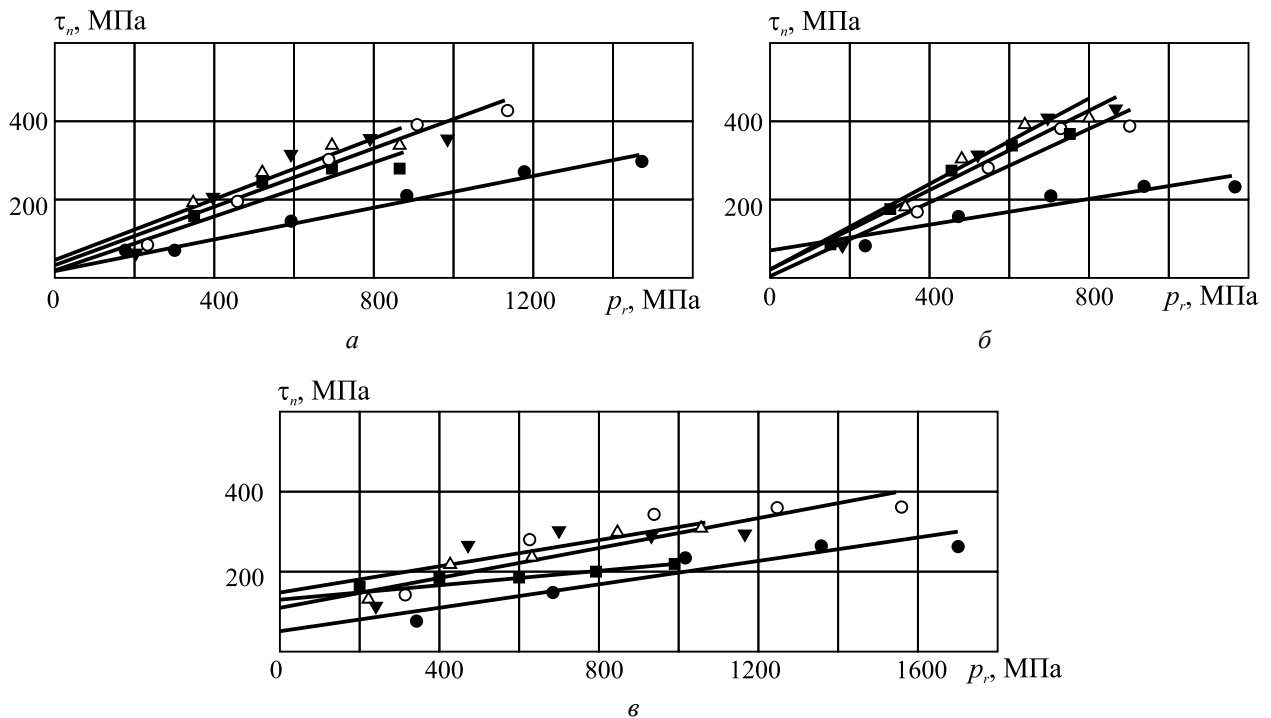


Рис. 1. Влияние контактного давления на тангенциальную прочность

адгезионных связей контакта образцов 12Х18Н10Т с инденторами
ТiС-ЖС6У (а), ЖС6У (б), ТiС-ВЖЛ14Н (в) при различных температурах:

• 20 °С; ○ 150 °С; ▼ 300 °С; △ 450 °С; ■ 600 °С – экспериментальные данные;
сплошные линии – регрессионные зависимости

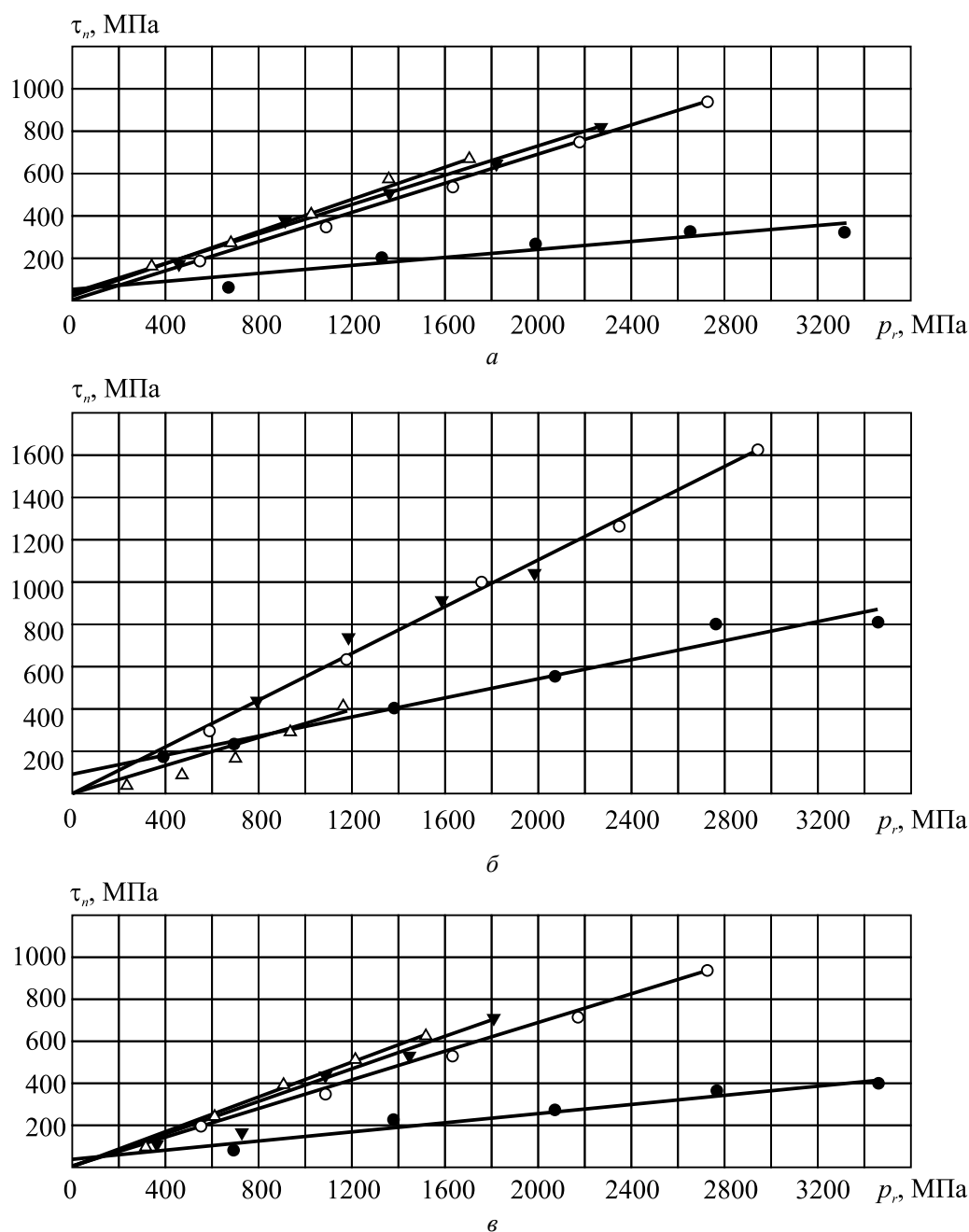


Рис. 2. Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей контакта образцов ЖС6У с инденторами TiC-ЖС6У (а), ЖС6У (б), TiC-ВЖЛ (в) при различных температурах:

● 20 °С; ○ 150 °С; ▼ 300 °С; △ 450 °С – экспериментальные данные;

сплошные линии – регрессионные зависимости

Зависимость адгезионной составляющей коэффициента трения f_t от температуры Θ тоже немонотонная: с максимумом для контртела из 12Х18Н10Т при температуре около 450 °С (см. рис. 4), для контртела из ЖС6У – при температуре около 200 °С (см. рис. 5) только для фрикционной пары ЖС6У-ЖС6У. Для других пар трения, начиная с температуры $\Theta \approx 200$ °С, величина f_t изменяется незначительно (см. рис. 5).

Нагрузочная способность фрикционного контакта (характеризуемая величиной p_m , пропорциональной кратковременному пределу текучести σ_t более мягкого материала тела пары трения [9]) для всех исследованных пар с повышением температуры контакта Θ уменьшается (см. рис. 4, 5). При этом применение сплава ЖС6У вместо стали 12Х18Н10Т в 1,5-2 раза повышает нагрузочную способность фрикционного контакта.

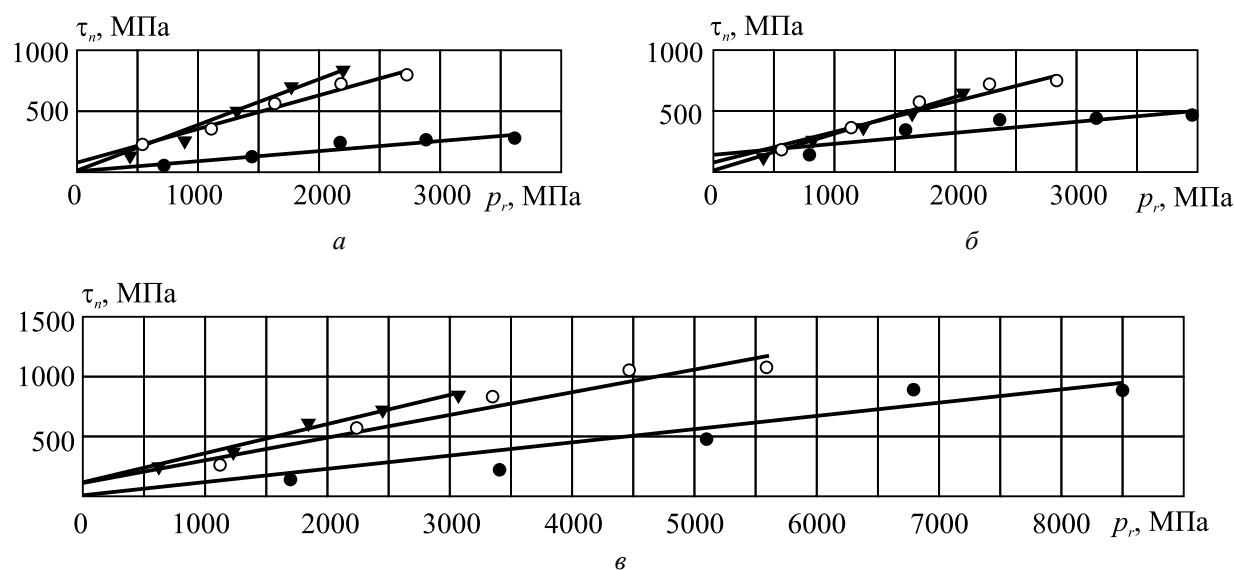


Рис. 3. Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей контакта инденторов с образцами при различных температурах:

a – TiC-ЖС6У (TiC-55%) – TiC-ЖС6У (TiC-45-50%);
б – TiC-ВЖЛ14Н (TiC-64%) – TiC-ЖС6У (TiC-45-50%);
в – TiC-ВЖЛ14Н (TiC-64%) – TiC-ВЖЛ14Н (TiC-64%);
 ● 20 °C; ○ 150 °C; ▼ 300 °C; △ 450 °C – экспериментальные данные;
 сплошные линии – регрессионные зависимости

Таблица 1

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении по стали 12X18H10T

Индентор / образец	Θ , °C	p_{rn} , МПа	τ_{nn} , МПа	f_t	β	τ_0 , МПа
TiC-ЖС6У / 12X18H10T	20	1474	314	0,213	0,194	29
	150	1136	455	0,400	0,384	19
	300	987	402	0,407	0,361	45
	450	865	378	0,438	0,380	50
	600	865	314	0,363	0,303	52
ЖС6У / 12X18H10T	20	1164	256	0,220	0,161	68
	150	903	423	0,468	0,454	12
	300	865	462	0,534	0,519	13
	450	796	442	0,555	0,543	10
	600	749	388	0,518	0,478	30
TiC-ВЖЛ14Н / 12X18H10T	20	1702	290	0,171	0,143	46
	150	1559	399	0,256	0,169	136
	300	1164	325	0,279	0,167	130
	450	1057	323	0,305	0,208	103
	600	987	211	0,213	0,066	145

Таблица 2

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении по сплаву ЖС6У

Индентор / образец	$\Theta, ^\circ\text{C}$	$P_m, \text{МПа}$	$\tau_{nn}, \text{МПа}$	f_t	β	$\tau_0, \text{МПа}$
TiC-ЖС6У / ЖС6У	20	3316	368	0,111	0,097	47
	150	2720	938	0,345	0,345	0
	300	2271	811	0,357	0,337	47
	450	1702	676	0,397	0,384	22
ЖС6У / ЖС6У	20	3459	871	0,252	0,226	89
	150	2937	1627	0,554	0,554	0
	300	1988	1095	0,551	0,551	0
	450	1164	385	0,331	0,331	0
TiC-ВЖЛ14Н / ЖС6У	20	3459	419	0,121	0,109	43
	150	2720	925	0,340	0,340	0
	300	1808	702	0,388	0,388	0
	450	1516	635	0,419	0,419	0

Таблица 3

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении керамики-металлических материалов

Индентор / образец	$\Theta, ^\circ\text{C}$	$P_m, \text{МПа}$	$\tau_{nn}, \text{МПа}$	f_t	β	$\tau_0, \text{МПа}$
TiC-ЖС6У (TiC-55%) / TiC-ЖС6У (TiC-45-50%)	20	3611	321	0,089	0,087	6
	300	2720	843	0,310	0,281	80
	450	2195	863	0,393	0,393	0
TiC-ВЖЛ14Н(TiC-64%) / TiC-ЖС6У (TiC-45-50%)	20	3946	500	0,127	0,095	126
	300	2825	800	0,283	0,263	56
	450	2053	620	0,302	0,302	0
TiC-ВЖЛ14Н(TiC-64%) / TiC-ВЖЛ14Н (TiC-64%)	20	8489	962	0,113	0,113	0
	300	5581	1171	0,210	0,187	128
	450	3056	862	0,282	0,243	121

Использование кермета в качестве материала хотя бы для одной детали пары трения существенно уменьшает как прочность адгезионных связей на срез τ_{nn} , так и молекулярную составляющую коэффициента трения f_t во всем исследованном диапазоне температур (см. рис. 3, 4).

Из данных табл. 1 и 3 следует, что использование кермета даже в одной из деталей пары трения уменьшает величину фрикционного параметра β и, следовательно, величину τ_{nn} при одном и том же давлении P_r .

Данные исследований (см. табл. 1–3) показывают, что если во фрикционном контакте участвуют тела из керамики-металлических

материалов или с износостойкими покрытиями, значения параметра τ_0 увеличиваются. Это может быть связано с повышением энергии активации E_b вязкого течения фрикционного контакта. При этом величина параметра τ_0 существенно меньше величины τ_{nn} .

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 6, свидетельствуют о том, что при применении изучаемых керметов в обеих деталях пары трения наблюдаются следующие эффекты:

– повышается несущая способность (величина P_m) фрикционного подвижного контакта примерно в 1,2-2 раза по сравнению с парами, в которых лишь одна деталь из кермета;

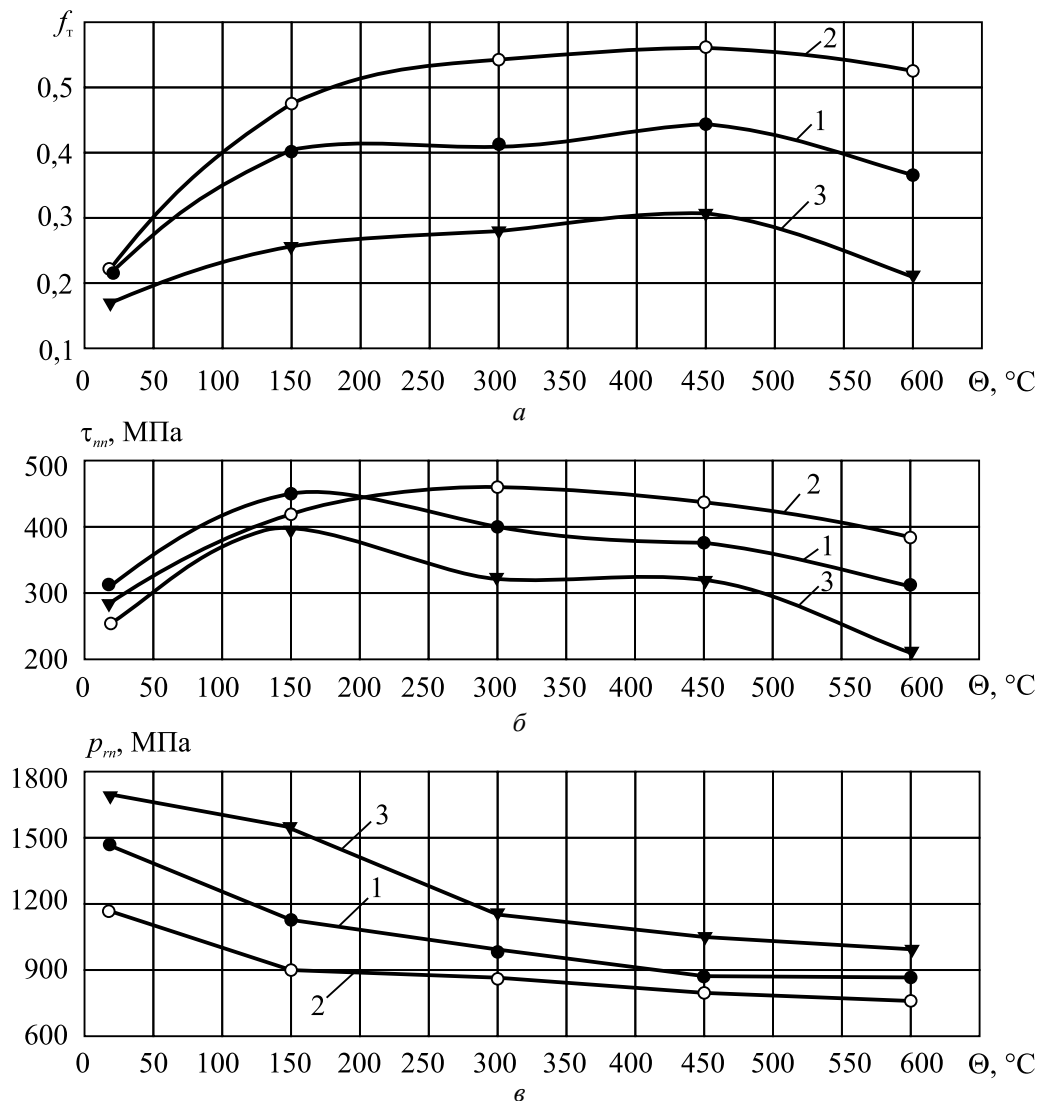


Рис. 4. Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта образцов 12Х18Н10Т с инденторами: а – адгезионная составляющая коэффициента трения; б – предельная прочность адгезионных связей на срез; в – предельное давление; 1 – TiC-ЖС6У; 2 – ЖС6У; 3 – TiC-ВЖЛ14Н

– повышение температуры не приводит к значительному уменьшению несущей способности фрикционного контакта;

– незначительно изменяется характер зависимости $\tau_m = f(\Theta)$ с максимумом при более высоких температурах контакта;

– постепенно (без скачков) увеличивается величина коэффициента трения f_t с повышением температуры контакта Θ в исследованном диапазоне;

– при температурах контакта выше ~100 °C уменьшается молекулярная составляющая коэффициента трения f_t (примерно в 1,5-2 раза).

При этом установлено, что наилучшие триботехнические характеристики (p_m , τ_m и f_t) обеспечивает фрикционная пара TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%) – TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%). Из данных табл. 2 следует, что именно у этой фрикцион-

ной пары параметр β имеет наименьшую величину, т.е. у этой пары трения внешняя нагрузка оказывает наименьшее влияние на величину тангенциальной прочности адгезионных связей на срез τ_n (что очень важно для обеспечения плотного контакта и герметизации при работе крана запорной арматуры).

Закключение

Результаты исследований свидетельствуют о том, что улучшение триботехнических характеристик рассмотренных керметов может быть связано с уменьшением пластичности материала тел фрикционного контакта и повышением энергии активации его вязкого течения.

Установлено, что применение керметов на основе карбида титана TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н в обеих деталях пары трения (шарового затвора

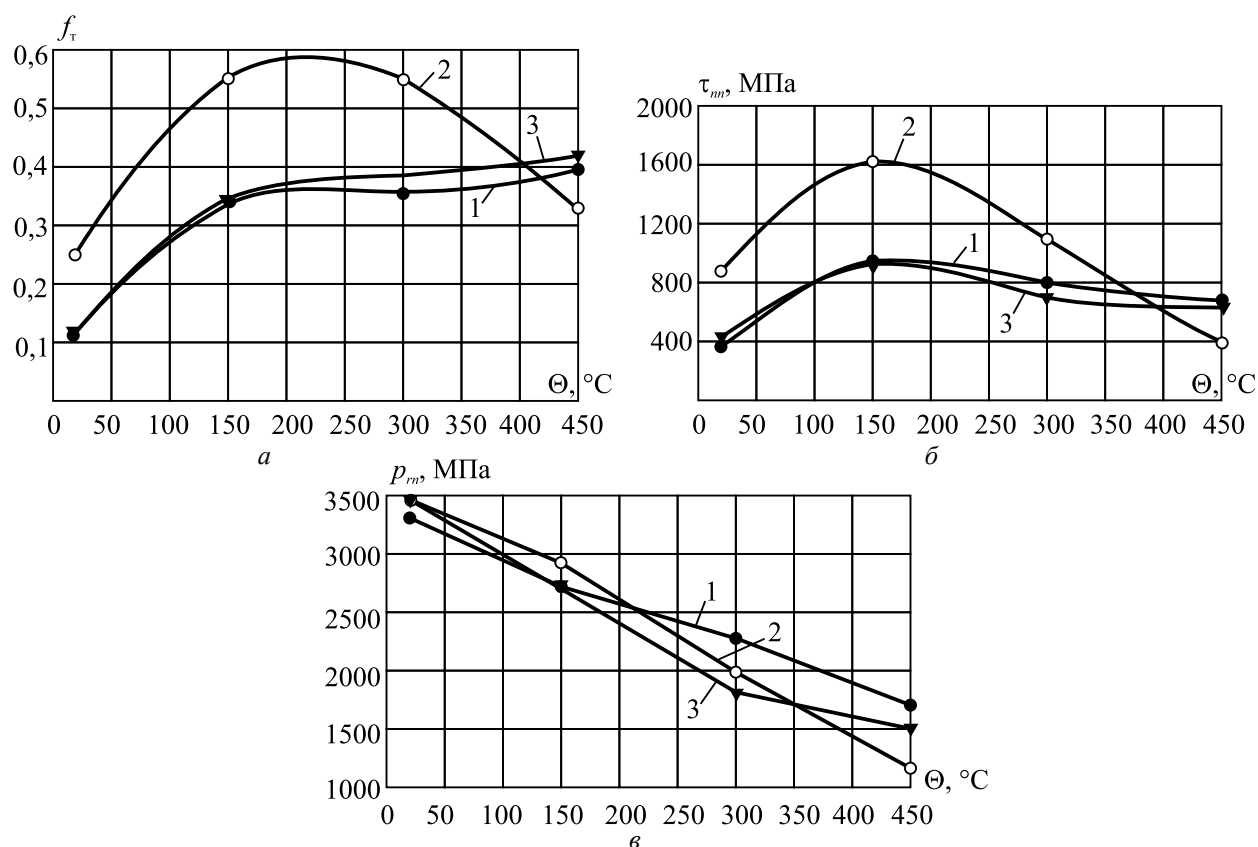


Рис. 5. Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта образцов ЖС6У с инденторами: *a* – адгезионная составляющая коэффициента трения; *б* – предельная прочность адгезионных связей на срез; *в* – предельное давление; 1 – TiC-ЖС6У; 2 – ЖС6У; 3 – TiC-ВЖЛ14Н

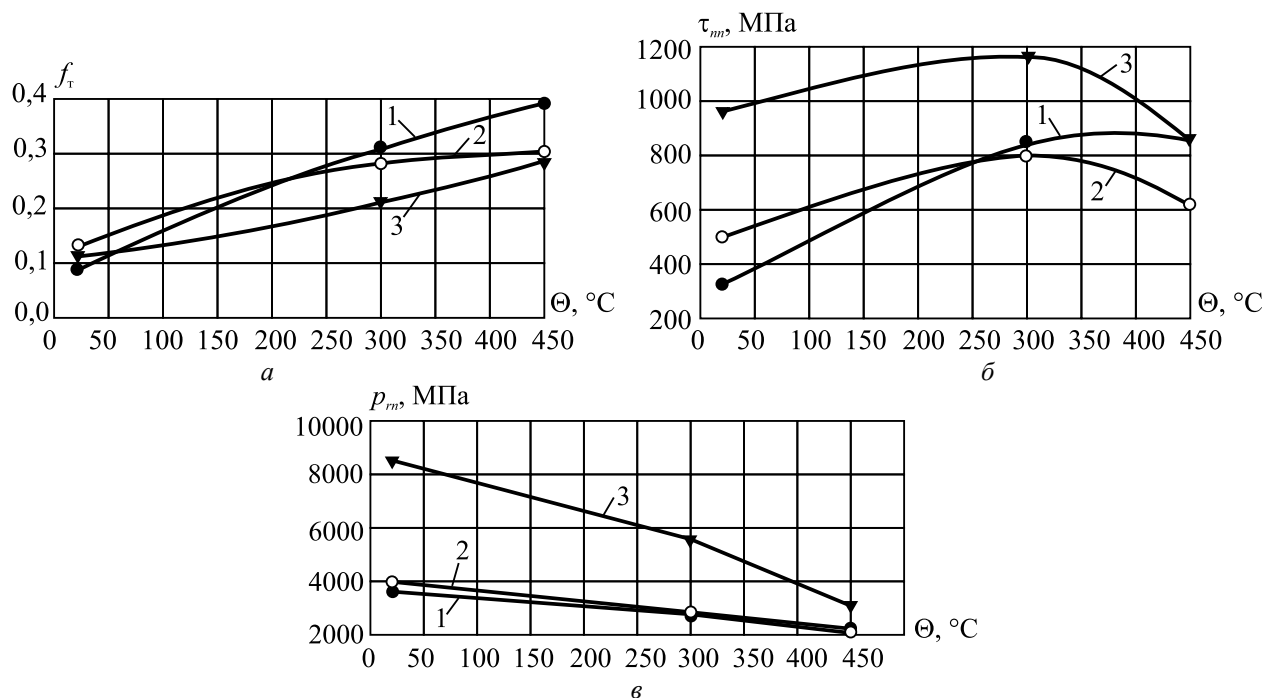


Рис. 6. Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта инденторов с образцами: *a* – адгезионная составляющая коэффициента трения; *б* – предельная прочность адгезионных связей на срез; *в* – предельное давление; 1 – TiC-ЖС6У (TiC-55%) – TiC-ЖС6У (TiC-45-50%); 2 – TiC-ВЖЛ14Н(TiC-64%) – TiC-ЖС6У (TiC-45-50%); 3 – TiC-ВЖЛ14Н(TiC-64%) – TiC-ВЖЛ14Н (TiC-64%)

и седла) может обеспечить более высокие показатели качества работы запорной арматуры по сравнению с другими материалами.

Список литературы

1. Мамлеев Рустам Ф., Мамлеев Рафиль Ф., Науширванов Р.Г. Изделия из высокотемпературных керметов TiC-Me для нефтепереработки и нефтехимии // Нефтепереработка и нефтехимия. 2010. № 4. С. 33–38.
2. Магалиф В.Я., Иткина Д.М., Корельштейн Л.Б. Монтажное проектирование химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. М.: Изд-во Инфра-Инженерия, 2010. – 344 с.
3. Мамлеев Р.Ф., Мамлеев Рус.Ф. Затворные узлы арматуры для тяжелых условий эксплуатации // Арматуростроение. 2014. № 6 (93). С. 47–52.
4. Шпаков О.Н. Диагностирование – важнейшее направление повышения конкурентоспособности приводов для арматуры // Арматуростроение. 2005. № 3 (35). С. 50–52.
5. Черноштан В.И., Кузнецов В.А. Трубопроводная арматура ТЭС: справоч. пособие. М.: Изд. МЭИ, 2001. – 368 с.
6. Ways of deteriorating the balls with structural gradient from the valves used in the oil extraction industry / I. Popescu, R.M. Negriu, S.G. Badea, C. Besleaga, M. Stefanescu // Structural Integrity and Life. 2013. Vol. 13. No 1. P. 17–22.
7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
8. Журков С.Н., Томашевский Э.Е. Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения // Некоторые проблемы прочности твердого тела. Киев: Изд-во АН УССР, 1959. С. 68–79.
9. Френкель Я.И. На заре новой физики // Сборник избранных научно-популярных работ. Л.: Наука, 1970. – 267 с.
10. Крагельский И.В., Любарский И.М., Гусяков А.А. Трение и износ в вакууме. М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
11. Покрывтия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке / Л.Ш. Шустер, Н.К. Криони, В.Ю. Шолом, М.Ш. Мигранов. М.: Машиностроение, 2008. – 318 с.
12. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. Т. 2 / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
13. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968. – 288 с.
14. Доценко А.Н., Буяновский И.А. Основы триботехники. М.: Инфра-М, 2014. – 336 с.

Материал поступил в редакцию 28.10.2015

ШУСТЕР

Лева Шмульевич

E-mail: okmim@ugatu.ac.ru
Тел.: (347) 273-07-34

Доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования механизмов и машин» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет». Сфера научных интересов – трибология, триботехника. Автор 8 монографий, более 400 научных статей, 12 изобретений.

МАМЛЕЕВ

Рафиль Фаритович

Тел.: (347) 273-77-55
E-mail: rafilmamleev@gmail.com

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет». Сфера научных интересов – технология литейного производства. Автор 5 монографий, более 70 научных статей, 3 изобретений.

МАМЛЕЕВ

Рустам Фаритович

E-mail: mircom@mail.ru
Тел.: (347) 292-49-35

Кандидат технических наук, директор ООО «МАРОМА Технологии». Сфера научных интересов – керамика-металлические материалы, шаровые краны. Автор более 50 научных статей, 11 изобретений.

КАМАЛЕТДИНОВА Регина Рамилевна

E-mail: regisha07.90@mail.ru
Тел.: (347) 273-07-34

Аспирантка кафедры «Основы конструирования механизмов и машин» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет». Сфера научных интересов – технология литейного производства, трибология. Автор 8 научных статей.