

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ САФИРОВОГО ИНСТРУМЕНТА С МЕТАЛЛАМИ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЧИСТОВОЙ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ

М. В. КАСЬЯН, К. М. МИРЗОЕВ, В. В. АБРАМОВ, Н. А. НЕРЕТИН,
Н. В. УРУСОВ, Г. А. СЕМЕНОВ

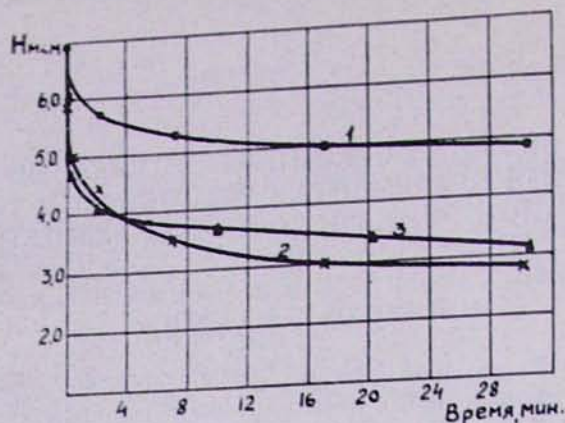
Одним из методов, обеспечивающих существенное повышение эксплуатационных характеристик деталей машин и приборов, является чистовая отделочная обработка синтетическими сверхтвердыми материалами (алмаз, корунд, боразон и др.) [1—5]. Выглаживание синтетическими сверхтвердыми материалами нашло широкое применение при обработке цветных металлов и сталей. Наряду с этим применение в машиностроении и приборостроении таких активных металлов, как титан, цирконий, тантал и ниобий, вызывает необходимость их чистовой отделочной обработки. В [4 и др.] отмечено, что при чистовой отделочной обработке активных металлов силы адгезионного взаимодействия велики.

В данной работе, на примере выглаживания плоских поверхностей титана (активный металл) и железоникелевого сплава 50Н (неактивный металл), проанализированы экспериментальные результаты по кинетике сглаживания микровыступов Ti и сплава 50Н («Фени») при чистовой отделочной обработке искусственным монокристаллическим сафиром в условиях термомеханического воздействия и рассмотрен механизм контактного взаимодействия атомов обрабатываемого металла и инструмента с позиций топомеханических реакций, протекающих на поверхностях твердого тела.

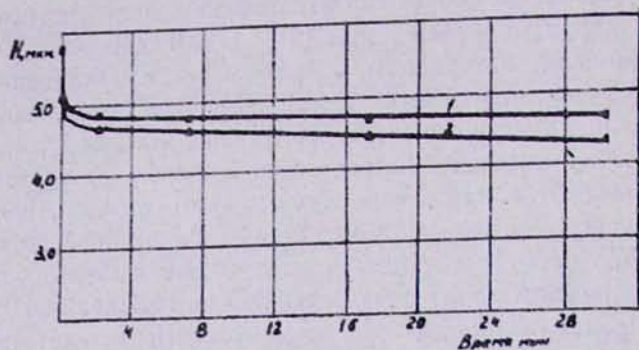
Экспериментальные исследования по кинетике сглаживания микровыступов и фрактографии проводили по методике, описанной ранее [6]. Глубина вакуума составляла $1 \cdot 10^{-5}$ — $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

В связи с тем, что процесс чистовой отделочной обработки плоским сафировым инструментом осуществляется в условиях одновременного воздействия давления и температуры [5], нами были проведены эксперименты по определению влияния температуры и давления на интенсивность сглаживания микровыступов Ti и «Фени» при чистовой отделочной обработке их плоским сафировым инструментом.

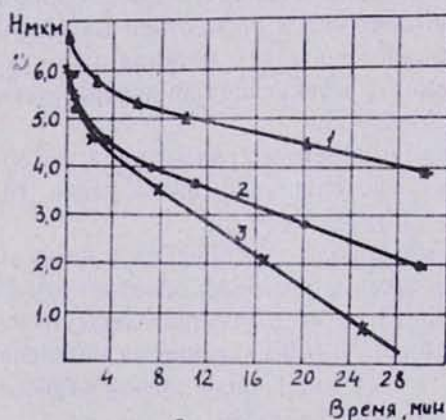
На рис. 1 приведены кинетические кривые сглаживания микровыступов титана (а, б) и сплава 50Н (в, г). Из анализа полученных данных (рис. 1а, б) следует, что изменение температуры, давления и характера их воздействия не оказывает значительного влияния на изменение скорости процесса сглаживания микровыступов титана, как это имеет место для сплава 50Н (рис. 1в, г) и других неактивных металлов [6], а на кинетических кривых можно отметить три основных участка: период



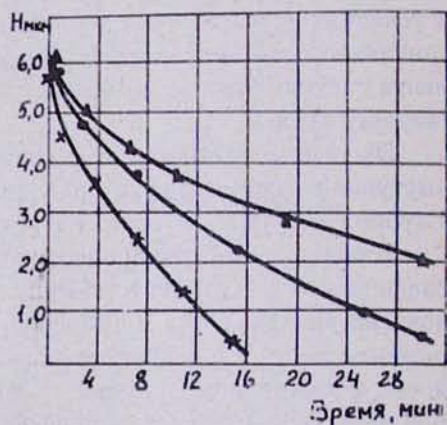
а



б



в

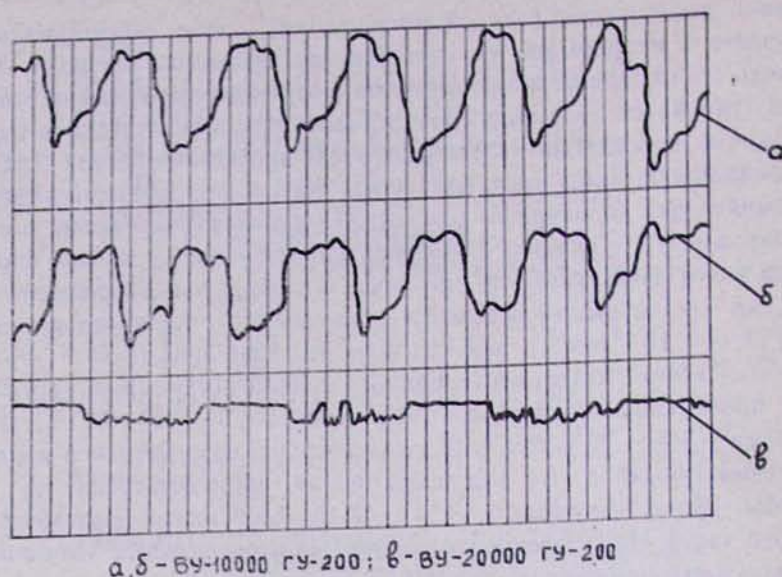


г

Рис. 1. Кинетические кривые сглаживания микровыступов титана (а, б) и железоникелевого сплава 50Н (в, г) при чистовой отделочной обработке синтетическим сапфиром. а — кривые: 1 — $T=800^{\circ}\text{C}$, 2 — 850°C , 3 — 900°C , $p=1,5 \text{ кг/мм}^2$; б — кривые: 1 — $T=850^{\circ}\text{C}$, 2 — 900°C , $p=0,5 \text{ кг/мм}^2$; в — кривые: 1 — $T=900^{\circ}\text{C}$, 2 — 1000°C , 3 — 1200°C , $p=1,0 \text{ кг/мм}^2$; г — кривые: 1 — $T=900^{\circ}\text{C}$, 2 — 1150°C , 3 — 1200°C , $p=1,0 \text{ кг/мм}^2$.

активной деформации (период нагружения): этап неустановившейся ползучести с непрерывно уменьшающейся скоростью процесса. Интенсивность сглаживания микровыступов в эти моменты времени резко падает и становится постоянной на третьем этапе. Сопоставление полученных данных по кинетике сглаживания микровыступов титана с данными по сглаживанию микровыступов сплава 50Н и результатами работы [6] показывает, что несмотря на одинаковый уровень напряжений в контакте микровыступ — сапфир (температура, давление и высота микровыступов идентичны) скорость процесса сглаживания микровыступов титана на этапе установившейся ползучести значительно меньше ($1 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-9} \text{ сек}^{-1}$), чем для меди и сплава 50Н ($5 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$). Расчет длительности полного сглаживания микровыступов титана, проведенный для параметров процесса: $T=800 \div 900^\circ\text{C}$, $p=0,5$ и $1,5 \text{ кг/мм}^2$, $\nabla 6 - \nabla 7$, без учета химического воздействия в контакте и сил трения, показал, что для сглаживания микровыступов до класса чистоты, соответствующего $\nabla 12 - \nabla 13$, необходима выдержка в несколько часов. Циклическое изменение давления на этапе установившейся ползучести не привело к значительному (заметному) ускорению процесса сглаживания микровыступов, в отличие от обработки неактивных металлов.

Сопоставление полученных результатов и результатов профилографирования обрабатываемых поверхностей титана (рис. 2а, б), сапфира (рис. 2в) и фрактографических исследований (рис. 2г) позволяет предположить, что затрудненность сглаживания микровыступов титана заключается в высокой химической активности титана в контакте с сапфиром. Это же явление замечается при шлифовании титановых сплавов, в том числе и алмазными кругами. Экспериментально установлено, что относительные значения площадей мостиков схватывания на сапфире, образовавшихся при контактировании, и суммы ответных контактных площадок на микровыступах титана совпадают. Образование прочных химических связей между поверхностным слоем атомов сапфира и титана прошло только на контактных площадках деформированных микровыступов титана. Длительная выдержка обрабатываемых поверхностей под давлением ($p=0,5$ и $1,5 \text{ кг/мм}^2$, $T=800 \div 900^\circ\text{C}$) не привела к заметному сглаживанию микровыступов и увеличению площади мостиков схватывания, несмотря на то, что объемная деформация образцов титана достигла 30—50%. Анализ полученных данных показывает, что образование прочных химических связей между поверхностным слоем атомов сапфира и титана происходит одновременно с образованием контактных площадок на сглаживаемых микровыступах титана во время их заметного пластического течения (период нагружения и этап неустановившейся ползучести) и одновременного достижения состояния физического контакта (т. е. сближения атомов поверхностей до расстояния, на котором принципиально возможны обменные процессы электронного взаимодействия). Слой адсорбированных газов в контакте микровыступов с сапфиром в условиях ведения процесса удаляется при нагреве в вакууме



× 450

Рис. 2. Характер профилограмм с микровыступов титана (а, б), сапфира (в) и фрактографическая картина поверхности сапфира (г) после контактирования с титаном. а — исх.; б — $t=17$ мин; в — $T=900^{\circ}\text{C}$; $p=1,5$ кг/мм², $t=60$ мин; г — титан на сапфире после контактирования, $\times 450$, $t=7$ мин; $T=850^{\circ}\text{C}$, $p=1,5$ кг/мм².

(физически сорбированные слои) и одновременном растекании микровыступов титана по сапфиру (химически сорбированные слои). При этом в состоянии физического контакта вступают атомы ювенильных участков поверхностей контактных площадок микровыступов, энергетически подготовленные (т. е. активные) к мгновенному химическому взаимодействию, что приводит к образованию прочных химических связей (схватыванию, налипанию на рабочую поверхность инструмента)

смешанного типа. При этом в элементарном акте химического взаимодействия принимает участие не один атом, а некоторая их совокупность (система поверхностных атомов) без изменения их взаимного расположения.

Процесс разрыва старых и образования новых связей относится к категории термически активируемых процессов [7]. Элементарный акт химического взаимодействия подразумевает прохождение атомов через ряд состояний, к которым относятся:

1. Энергетическая подготовленность атомов, которая определяется величиной приобретенной энергии. В условиях ведения процесса общий уровень энергии поверхностных атомов может быть повышен за счет термического и механического воздействия. Чем сильнее связаны между собой атомы и ниже температура процесса (в отсутствии механического воздействия), тем менее вероятен разрыв связей за счет термических флуктуаций и тем большее время атом будет находиться в положении равновесия (не в активном состоянии). В этом случае интенсивность разрыва старых и накопления новых связей будет очень мала. Атом, колеблясь с частотой 10^{13} сек $^{-1}$ около положения равновесия, имеет вероятность разорвать связь с соседними атомами за счет хаотически появляющихся на каждом из атомов тепловых флуктуаций, представляющих собой мгновенное сосредоточение повышенной кинетической энергии на атомах. При этом вероятность сосредоточения повышенной кинетической энергии (большой флуктуации) на атоме очень мала, а время «ожидания», по истечении которого произойдет разрыв связи за счет термической флуктуации, можно рассчитать по уравнению Я. И. Френкеля.

Наблюдаемый на практике факт, что при термомодеформационной обработке величина деформации микровыступов, достигнутая за период нагружения, может составлять десятки процентов, свидетельствует о том, что основную роль в возбуждении атомов и переводе их в активированное состояние играет пластическая деформация микровыступов обработки.

2. Длительность пребывания атомов в возбужденном (активном) состоянии, т. е. время активной жизни атома с момента достижения энергетического барьера до момента трансляции связи.

3. Длительность трансляции (образования новых) связей, т. е. длительность процесса обобществления электронов между двумя активными атомами. Анализ природы химической связи в твердых телах и кинетики химических реакций [8] позволяет считать, что отмеченные стадии элементарного акта химического воздействия протекают мгновенно (10^{-12} – 10^{-13} сек). Таким образом, полная энергия системы взаимодействующих атомов, находящихся в состоянии физического контакта и претерпевающих химическое превращение (разрыв старых и образование новых связей), на протяжении элементарного акта остается неизменной. Сообщение поверхностным атомам энергии за счет пластической деформации приконтактных объемов следует рассматривать как времен-

ный процесс. При сближении поверхностей, на каждой из которых имеется комплекс адсорбции (физически и химически сорбированные слои кислорода), на расстоянии уже $1000 \div 2000 \text{ \AA}$ обнаруживаются значительные силы притяжения, которые носят электростатический характер. Для того, чтобы произошло схватывание, т. е. произошла трансляция химических (металлических) связей между атомами двух контактируемых поверхностей в условиях отделочной обработки, когда сближение атомов поверхностей осуществляется за счет пластического деформирования металла, необходимо выполнение некоторых условий. Атомы контактируемых поверхностей необходимо сблизить до расстояния, на котором принципиально возможно образование связей. Химическая связь между атомами возникает в результате взаимодействия, в основном, электронов внешних (валентных) оболочек атомов (в переходных металлах, таких как железо, никель, кобальт, частично заполненные внутренние электронные оболочки также дают существенный вклад в образование связей [7, 9, 10]). Химические межатомные связи по своей природе являются электромагнитными и действуют на расстоянии порядка 10^{-8} см , при этом минимум потенциальной энергии системы двух атомов металла соответствует расстоянию, равному по порядку величины постоянной кристаллической решетки ($\approx 3\text{ \AA}$). Такое сближение атомов соединяемых поверхностей на расстояние параметра кристаллической решетки в условиях принятой схемы ведения процесса осуществляется за счет термически активируемой пластической деформации приконтактных объемов и предусматривает удаление физически и химически сорбированных слоев кислорода. Активированные атомы, сближенные на необходимое расстояние, в этих условиях будут обладать энергией, достаточной для взаимодействия (образования связей). Для всех металлов обладающих значительным сродством к кислороду, энергия активации адсорбции кислорода очень мала, и наоборот, энергия активации десорбции хемосорбированного кислорода очень велика и приблизительно равна теплоте адсорбции. Поэтому можно полагать, что принципиально энергия активации образования связей между атомами двух поверхностей может быть равна величине теплоты сублимации или энергии разрыва связей одного из материалов, несмотря на то, что внешне процесс может казаться неактивируемым, вследствие вышеотмеченного и вступления в контакт атомов ювенильных поверхностей. Таким образом, для схватывания при чистовой отделочной обработке в вакууме необходимо и достаточно сблизить атомы контактируемых поверхностей за счет пластической деформации на расстояние параметров кристаллической решетки при отсутствии физически и химически сорбированных слоев на свариваемых поверхностях; последующие обменные процессы электронного взаимодействия приводят к образованию прочных химических связей.

В условиях твердофазного взаимодействия схватывание будет представлять собой некоторую совокупность последовательного разрыва старых и образования новых связей, и, таким образом, рассматриваемый процесс (химическая реакция данного типа) будет иметь электронный

механизм, однако интенсивность развития отдельных стадий и процесса в целом будет предопределяться природой контактируемых материалов. Факт интенсивного схватывания титана с сапфиром в условиях термомеханического воздействия и в отсутствие сорбированного кислорода может быть объяснен взаимным заполнением не полностью насыщенных связей поверхностных слоев между изоморфными структурами $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и Ti_2O_3 и последующим образованием твердого раствора кислорода в титане. Ионы титана, имеющего одну из ступеней окисления Ti_2O_3 со структурой изоморфной $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, могут компенсировать, при взаимной активности поверхностей, частично незаполненные связи ионов O^{2-} в решетке сапфира. Такое сильное взаимодействие препятствует дальнейшему растеканию микровыступов, их сглаживанию и увеличению площади контакта. В отличие от неактивных металлов, микровыступы на обрабатываемых поверхностях титана не свариваются между собой по боковым образующим и не объединяются в отдельные участки плоского контакта в процессе их течения, что обусловлено низким коэффициентом самодиффузии при температуре процесса, большой концентрацией сорбированного кислорода, вязкостью титана и высокой химической активностью его поверхности.

В процессе проведения экспериментов по чистовой отделочной обработке титана сапфиром было установлено, что после выдержки при температуре процесса и последующего охлаждения при снятии давления с образцов происходит саморазрушение первоначально образовавшихся мостиков схватывания по приконтактному слою титана. Эксперименты показали, что толщина слоя титана, остающегося на рабочей поверхности сапфира, составляет $0,4 \div 2,0$ мкм, независимо от длительности выдержки образцов под давлением. Как показали замеры микротвердости, в приконтактном объеме ряда обрабатываемых металлов (медь, никель, титан, сплав 50Н и др.) в условиях термомеханического воздействия образуется разупрочненная «мягкая прослойка» [6], распространяющаяся в глубину примерно до $3 \div 5$ мкм. По-видимому, причиной саморазрушения мостиков схватывания титана с сапфиром можно считать весьма активное схватывание их между собой в периоды пластического течения вершин микровыступов в совокупности с ограниченными возможностями сваривания микровыступов титана между собой и образованием «мягкой прослойки» в приконтактном объеме. Способствует этому и близкое к единице отношение предела текучести к пределу упругости.

Предложенный механизм имеет место лишь в процессе взаимной активации контактирующих поверхностей при пластическом течении титана по поверхности сапфира и образовании ювенильной поверхности в контакте. Как только удельное давление сжатия падает ниже σ_t , активация и схватывание прекращаются и при деформации микровыступов $\approx 30\%$ начинается упругое (в отличие от меди, никеля, сплава 50Н и других металлов) искривление боковых поверхностей микровыступов (особенно для металлов, у которых отношение $\sigma_t/\sigma_{\text{упр}}$ близко к единице) с появлением растягивающих поверхностных напряжений, тем больших,

чем больше радиус кривизны изгиба боковой поверхности микровыступа. В зонах пониженной прочности металла в контакте титан — сапфир эти напряжения, не успевшие релаксировать за счет пластического течения, могут превысить σ_0 металла и вызвать образование зародышей микротрещин или же полностью распространиться по всему сечению вершины микровыступа. В результате этого, после снятия давления с образцов происходит саморазрушение мостиков схватывания титана с сапфиром по ослабленному приконтактному слою, а на рабочей поверхности деформированного микровыступов титана. Кроме того, прочность образующейся химической связи (смешанного титана) между атомами поверхностного слоя сапфира и титана выше прочности металлической связи атомов в кристаллической решетке титана. Совокупность отмеченных факторов и приводит к саморазрушению мостиков схватывания по приконтактному слою титана.

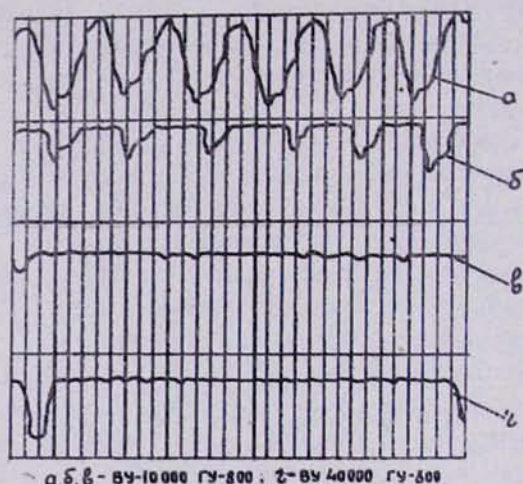


Рис. 3. Профилограммы с поверхности микровыступов железоникелевого сплава 50Н, а—исх.; б— $t=7$ мин; в— $t=25$ мин; р— $t=30$ мин.

Результаты профилографирования поверхности железоникелевого сплава 50Н (рис. 3) показывают, что характер сглаживания и смятия микровыступов подчиняется основным закономерностям, отмеченным ранее [6]. В процессе проведения экспериментов по чистовой отделочной обработке сплава 50Н (не активный металл) монокристаллическим сапфиром было установлено, что при непрерывном процессе выглаживания заметное схватывание контактирующих материалов наблюдается только лишь при сглаживании микровыступов примерно на $4/5$ от исходной высоты, при этом площадь физического контакта достигает 70—80%. Такой характер развития топохимического взаимодействия (схватывания) в контакте сапфир—сплав 50Н связан с особенностями течения микровыступов пластичных металлов (медь, никель и другие металлы), склон-

ностью к контактному химическому взаимодействию, а также особенно с электронного строения атомов неактивных металлов [10]. По достижении в процессе обработки сплава 50Н ~ 80% деформации микровыступов наблюдается сваривание их боковых образующих между собой, объединение в отдельные участки плоского контакта с ювенильной поверхностью и растекание металла контактных площадок под действием касательных напряжений по поверхности сапфира. В условиях ведения процесса (высокая температура, давление сжатия, вакуум) такое растекание металла по поверхности сапфира приводит к удалению сорбированных слоев кислорода, активации контактируемых поверхностей, образованию свободных радикалов и последующему образованию прочных химических связей между слоем поверхностных атомов сплава 50Н и сапфира. На начальных этапах сглаживания микровыступов схватывания нами не было обнаружено. Очевидно, что в этих условиях взаимодействие поверхностных атомов сплава 50Н с сапфиром на начальных этапах процесса носит слабый электростатический характер без образования прочных химических связей смешанного типа и кристаллографического соответствия. На последующей стадии взаимодействия происходит образование прочных химических связей. В пользу этого свидетельствует и тот наблюдаемый на практике факт, что интенсивное схватывание начинается лишь при значительной площади активированных участков контакта (70÷80%), свободной от химически сорбированных ионов кислорода, могущих частично компенсировать ионы M_c^{+n} . Потенциальная яма при этом меньше, чем в случае химического взаимодействия, однако она имеет место при большем удалении взаимодействующих ионов [11]. Кроме того, схватыванию сплава 50Н с сапфиром на этой стадии процесса способствует его высокая пластичность и сваривание боковых образующих микровыступов во впадинах при их сглаживании в условиях получения зеркальной поверхности металла, ответной сапфиру. Такое пластическое течение металла микровыступов приводит к релаксации поверхностных растягивающих напряжений и предотвращает саморазрушение мостиков схватывания в приконтактном объеме; высокое отношение τ_t/σ_{yp} также понижает вероятность накопления растягивающих поверхностных напряжений (в отличие от варианта титан—сапфир).

Приведенная в работе [6] методика исследования кинетики сглаживания микровыступов позволяет расчетным путем, зная кинетическую кривую образования контактных площадок на микровыступах, определить полную площадь физического контакта и рассчитать нормальные напряжения, действующие в контакте сглаживаемый микровыступ — плоский сапфировый инструмент.

Известно, что при обработке торцевой части цилиндрического образца на токарном или строгальном станках образуются микровыступы, часто треугольного профиля. В первом случае микровыступ представляет собой непрерывную кривую, представляющую собой архимедову спираль (это кривая, описываемая точкой, движущейся с постоянной скоростью ω по лучу, вращающемуся около центра с постоянной угловой скоростью

ω). Такая кривая в полярных координатах описывается следующим уравнением:

$$\rho = \frac{v}{\omega} \cdot \varphi. \quad (1)$$

При точении резец движется с постоянной скоростью v , а деталь вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = 2\pi \cdot n$, где n — число оборотов в единицу времени. Таким образом, кривая, описываемая резцом на поверхности образца, является аналогом архимедовой спирали. В процессе чистовой обработки микровыступы (в наших экспериментах треугольной формы) сглаживаются, а общая площадь контакта увеличивается. Полагая, что в каждый произвольный момент времени ширина контактной площадки (S) постоянна для всей поверхности, можно вычислить полную площадь контакта. Поверхность контакта (рис. 4а) будет

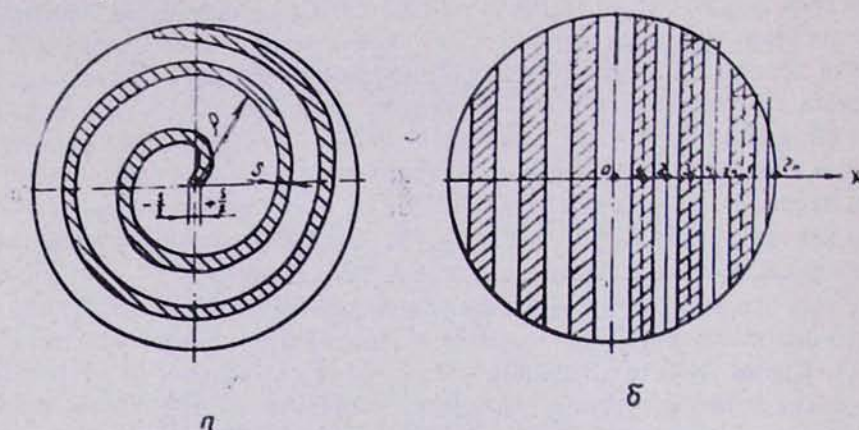


Рис. 4. Схема геометрического расположения микровыступов на торце образца. а — точение, б — шлифование.

ограничена двумя архимедовыми спиралями, отстоящими друг от друга на расстояние S и описываемыми уравнениями (2), (3) в полярных координатах:

$$\rho_1(\varphi) = \frac{v}{\omega} \varphi - \frac{S}{2}, \quad (2)$$

$$\rho_2(\varphi) = \frac{v}{\omega} \varphi + \frac{S}{2}. \quad (3)$$

Площадь, ограниченная этими кривыми, может быть выражена через двойной интеграл

$$F = \int_0^{\Phi} \int_{\rho_1(\varphi)}^{\rho_2(\varphi)} \rho d\rho d\varphi, \quad (4)$$

где $\Phi = \omega T$; $T = \frac{R}{v}$ — время обработки детали точением. Произведя интегрирование, получим

$$F = \int_0^{\Phi} \int_{\varphi(\varphi)}^{\varphi(\varphi+z)} v d\varphi \cdot dz = \frac{v \cdot \omega \cdot T^2 \cdot S}{2} \quad (5)$$

Так как $R = v \cdot t$, $\omega = 2\pi \cdot n$ и $N = n \cdot t$ — число микровыступов, приходящихся на длину, равную радиусу образца, получим

$$F = \pi N R S \quad (6)$$

Обозначив через $e = \frac{S \cdot N}{R}$ относительную ширину контактных площадок ($0 < e \leq 1$) и подставляя в (6), получим

$$F = e \cdot \pi \cdot R^2 \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет, зная относительную ширину контактных площадок (определяется по кинетической кривой экспериментально) и радиус образца, рассчитать площадь контакта, образующегося при чистовой отделочной обработке плоским сапфировым инструментом.

Рассмотрим второй случай, когда на обрабатываемой поверхности нанесены строганием треугольные микровыступы, представляющие собой параллельные равноотстоящие друг от друга полоски (рис. 4б) постоянной ширины (их ширину обозначим через S). Площадь контактной поверхности F (заштрихованные области) может быть выражена уравнением

$$F = 4 \sum_{i=1}^n \int_{\underline{x}_i}^{\overline{x}_i} \sqrt{R^2 - x^2} dx \quad (8)$$

где $\underline{x}_i = \frac{R(2i-1-S)}{2n}$, $\overline{x}_i = \frac{R(2i-1+S)}{2n}$,

n — количество полосок на половине круга. Заменяя каждый интеграл площадью прямоугольника шириной $\frac{S \cdot R}{n}$ и высотой $\sqrt{R^2 - \left(\frac{2i-1}{2n}\right)^2 R^2}$, получим выражение для приближенного вычисления площади контакта

$$F = 4 \cdot S \cdot \frac{R^2}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{1 - \left(\frac{2i-1}{2n}\right)^2} \quad (9)$$

Так как выражение (9) является приближенной формулой для вычисления площади круга по методу прямоугольников, необходимо оценить

погрешность предложенной формулы. Поскольку вторая производная подынтегральной функции не непрерывная при $X=R$, для оценки погрешности разобьем участок интегрирования на два интервала. Первый интервал от 0 до $\frac{2n-2}{2n}R$ и второй от $\frac{2n-2}{2n}R$ до R .

Для первого участка погрешность будет составлять (согласно методу прямоугольников)

$$R_1 = -\frac{R^2}{24n^2} \cdot \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{2n-2}{2n}\right)^2\right]^{3/2}}$$

или

$$|R_1| = \frac{R^2 \cdot n}{24(2n-1)^{3/2}}.$$

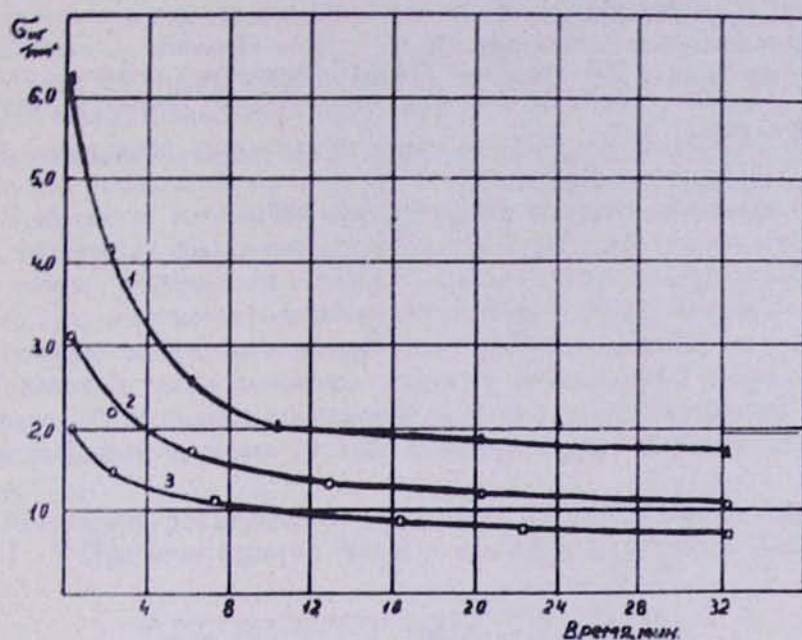
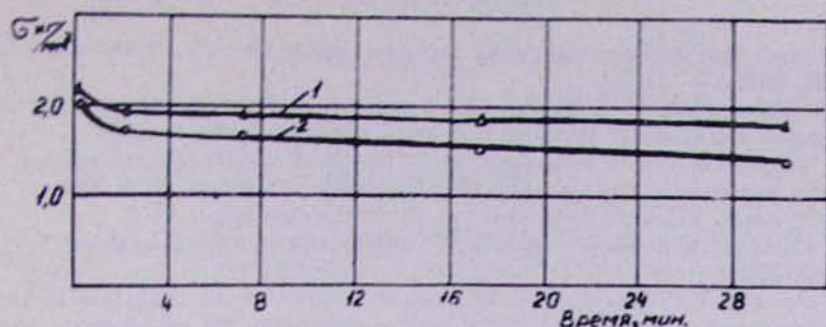
Для второго участка погрешность можно вычислить непосредственно:

$$\begin{aligned} R_2 &= \int_{\frac{x}{n}}^{x_n} \sqrt{R^2 - x^2} dx - \frac{R^2}{n} \sqrt{1 - \left(\frac{2n-1}{2n}\right)^2} = \\ &= \frac{R^2}{2} \left[\arcsin \frac{\sqrt{2n-1}}{n} - \frac{(n-1)\sqrt{2n-1}}{n^2} - \frac{\sqrt{4n-1}}{n^2} \right]. \end{aligned}$$

После несложных преобразований получим

$$|R_2| \leq \frac{R^2}{3n\sqrt{n}}.$$

Для нашего случая, когда $n=17$, погрешность составляет $\sim 1\%$. Отсюда следует, что для вычисления площади контакта, образующегося в результате сглаживания строганных микровыступов, также можно пользоваться формулой (7). С помощью формулы (7) нами были рассчитаны нормальные напряжения, действующие в контакте микровыступ—сапфир. На рис. 5 приведены кинетические кривые изменения нормальных напряжений для пар материалов: сапфир—микровыступы титана (рис. 5а), сапфир—микровыступы сплава 50Н (рис. 5б). Приведенные данные показывают, что истинные значения действующих напряжений во много раз превосходят заданные напряжения, рассчитанные для сплошного контакта. При этом характеры кинетических кривых сглаживания микровыступов и нормальных напряжений аналогичны друг другу. Анализ полученных данных показывает, что несмотря на то, что действующие



б

Рис. 5. Кинетика изменения нормальных (σ) напряжений в контакте микро-выступ — сапфировый инструмент. а — титан, $P=47,5$ кг, кривые: 1 — $T=850^\circ\text{C}$, 2 — 900°C ; б — сплав 50Н, $P=47,5$ кг, кривые: 1 — $T=900^\circ\text{C}$, 2 — 1100°C , 3 — 1200°C .

напряжения в контакте микровыступ титана — плоский сапфировый инструмент превосходят по величине предел текучести титана, микро-выступы на его поверхности практически не деформируются, а объем деформируется значительно. Все это свидетельствует о том, что затрудненность сглаживания микровыступов титана и других активных металлов сапфировым инструментом обусловлена интенсивным химическим взаимодействием в контакте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Г. Шнейдер. Чистовая обработка металлов давлением. М.—Л., «Машиностроение», 1963.
2. Л. Н. Грацианский, М. Т. Согоян. Отделочная обработка деталей синтетическими рубином и сапфиром. «Приборы и системы управления», № 11, 1967.
3. Л. А. Хворостухин, Н. В. Плешивцев, В. Н. Бибаев. Отделочно-упрочняющая обработка алмазным выглаживанием. «Вестник машиностроения», № 8, 1969.
4. В. М. Торбило. Алмазное выглаживание. М., «Машиностроение», 1972.
5. Н. В. Урусов, В. В. Абрамов и др. Способ отделочной обработки. А. С. 350640. Б. И. О. № 27, 1972.
6. В. В. Абрамов, Н. В. Урусов, К. М. Мирзоев, Н. А. Неретин. Выглаживание металлических поверхностей плоским сапфировым инструментом. Сб. «Воздействие режущего инструмента на физические свойства металлов», вып. III, Ереван, 1973.
7. Н. М. Эмануэль, Г. Г. Кнорре. Курс химической кинетики, М., 1969.
8. Ч. Коулсон. Валентность, М., «Мир», 1965.
9. Н. П. Рыкалин, М. Х. Шоршов, Ю. Л. Красулин. Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов. «Изв. АН СССР. Неорганические материалы», 1, № 1, 1965.
10. Г. В. Самсонов, И. Ф. Прядко, Л. Ф. Прядко. Конфигурационная модель вещества. Киев, «Наукова Думка», 1971.
11. J. E. Lennard-Jones. Trans. Faraday Soc., 28, 333, 1932.