

5. Термомеханические соединения элементами с памятью формы / Чернов Д.Б., Паперский А.П., Дасьянов У. и др. // Авиационная промышленность. – 1984. – № 6. – С. 63–68.
6. Хохлов В.А., Саруев А.Л., Закусов А.С., Судницкий А.А. Рациональные технологии создания термомеханических соединений // Проблемы геологии и освоения недр: Тр. XII Междунар. симпозиума. – Томск, 2007. – С. 67–68.
7. Максак В.И., Хохлов В.А., Зитов А.И. Методика и оборудование для исследования свойств тяжело нагруженного контакта тел из материалов с ПФ // Сб. исследований по строительной механике и строительным конструкциям. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. акад., 1990. – С. 79–86.

Поступила 01.03.2013 г.

УДК 669:539.612

## РАССЕЯНИЕ ЭНЕРГИИ И АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА КВАЗИГЕРЦЕВСКОГО КОНТАКТА МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

А.И. Потекаев\*, В.А. Хохлов, С.В. Галсанов, И.А. Шулепов\*\*

Томский государственный университет

\*Сибирский физико-технический институт им. акад. В.Д. Кузнецова, г. Томск

\*\*Томский политехнический университет

E-mail: potekaev@spti.tsu.ru

Установлена связь между рассеянием энергии в контакте материалов, определяемым параметрами петли гистерезиса, и адгезионным взаимодействием на площадках физического контакта при его циклическом сжатии. Отмечены особенности формирования петель в дискретном контакте тел из никелида титана.

### Ключевые слова:

Рассеяние энергии, адгезия, материалы с памятью формы.

### Key words:

Dissipation of energy, adhesion, shape memory materials.

### Введение

Приложение давления вызывает упруго-пластические деформации отдельных микронеровностей (МкН) и образование площадок физического контакта, размеры которых определяются сжимающими силами, геометрией контактирующих микроразностей и материалами контактирующих тел. Естественно, что часть микронеровностей не деформируется, часть находится в упругом состоянии, а часть – в упруго-пластическом. Циклическое действие давления вызывает у ранее пластически деформированных микронеровностей упругие деформации. Считается, что параметры контакта (давления  $q$ , сближение  $\delta$  и размеры площадки, определяемые через радиус  $a$ ) малонагруженных микронеровностей определяются теорией Герца, остальные – теорией упруго-пластического контакта.

Исследование особенностей контактной области весьма актуально для трибологии, в прикладных задачах трибосопряжений, фреттинг износа, а также конструкционного демпфирования колебаний.

Контакт, описываемый теорией Герца, предполагает сжатие в пределах упругих деформаций двух однородных или разнородных микронеровностей, моделируемых телами, например сферами. При сближении  $\delta$  контактирующих тел происходит образование площадки контакта радиусом  $a$ , а распределение давлений на ней представляется па-

работой с  $q=q_{\max}$  в центре площадки и  $q=q_{\min}=0$  на ее периферии. Снятие давления возвращает тело в исходное состояние без остаточных деформаций, причем адгезионно-молекулярное взаимодействие в областях соприкосновения теория Герца не учитывает.

Реальный процесс деформирования и возврата при снятии нагрузки выглядит иначе. Удалось, используя высокоточную измерительную аппаратуру, отследить процесс формирования деформационной зависимости сближение–нагрузка и образование петель гистерезиса при циклическом сжатии контакта [1].

В настоящей работе проводится анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) в контакте единичных микронеровностей с целью установить связь между деформационными зависимостями сближение  $\delta$  – давление  $q$ , представленными в виде петель гистерезиса, и адгезией в дискретном циклически сжимаемом контакте.

### Материалы, образцы, приборы и оборудование

Исследовались следующие материалы: сталь Ст3, сталь 45, сталь 40Х, медь М1, алюминий, свинец, индий, оргстекло, сплав ТН-1К ( $Ti_{50}Ni_{47.5}Fe_{2.5}$ ).

Образцы имели осесимметричную форму с контактной площадью  $10^{-4} \text{ м}^2$ .

Все металлические образцы отжигались по стандартной методике кроме никелида титана, ко-

торый отжигался в вакууме при температуре 800 °С с выдержкой 1 час.

В качестве измерительных приборов использовались емкостные датчики и датчики на основе фотодиодов, а также оптико-механическая система установки для исследования контактных деформаций УИКД-1 [2]. Точность измерений составляла  $10^{-8}$  м.

Нагружение нормальными силами проводилось на установке УИКД-1 и на прессе Лафона-Амслера.

#### Формирование петли гистерезиса

Рассмотрим стадии циклического деформирования на примере контакта двух поверхностей из стали 45 с дискретным контактом. При первом нагружении имеет место упруго-пластическая деформация микронеровностей (рис. 1, линия 1), подчиняющаяся параболическому закону. Нелинейность зависимости сближения  $\delta$  от нагрузки  $q$  связана, естественно, с ростом площади контакта при увеличении нагрузки и наблюдается как при первом, так и при повторных нагружениях. Если постепенно внешнюю нагрузку снижать до нуля, то при ее изменения значения  $\delta$  будут все больше приближаться к соответствующим значениям при той же нагрузке в процессе ее увеличения (рис. 1, линия 2). Таким образом, величины перемещений при нагружении и разгрузке различаются, причем разгрузочная ветвь располагается выше нагрузочной.

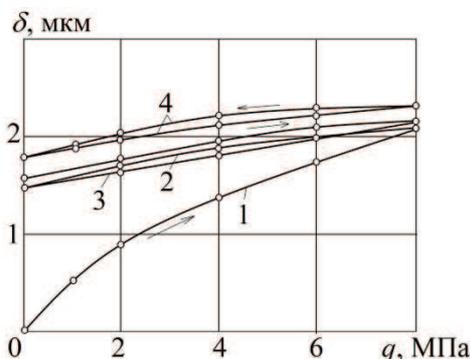


Рис. 1. Зависимость сближения от нагрузки при первом и повторном нагружениях. Сталь 45,  $Ra=12,5$  мкм

При повторном нагружении без изменения тангенциального расположения образцов новая кривая нагрузки не совпадает с разгрузочной ветвью, хотя и близко к ней располагается (рис. 1, линия 3). Амплитуда сближения в этом случае будет смещена по оси  $\delta$  в сторону больших ее значений. После шести–восьми циклов деформирования контакта нагрузочные и разгрузочные ветви имеют общие точки при  $q=0$  и  $q_1=q_n=0,8$  МПа, а промежуточные значения  $\delta$  не совпадают (рис. 1, линия 4). Если продолжать циклически нагружать контакт, форма и величина петли практически не изменится. Контакт приобретает упругие свойства. Необходимость неоднократного нагружения для получения замкнутой петли объясняется тем, что в процессе первого нагружения выбрана основная

часть пластической деформации, соответствующая данной нагрузке. При последующем сжатии микронеровности продолжают деформироваться упруго-пластически, но с меньшей пластической составляющей [3].

Число циклов, необходимое для получения петли, зависит от упруго-пластических свойств материала и равно 6–7 для малопластичных (стали) и до 10–12 для пластичных (свинец, индий) металлов, для никелида титана – 2–3 цикла.

Несовпадение линий упругого сближения под нагрузкой и упругого возврата после снятия, приводящее к рассеянию энергии, указывает на то, что в контакте возникают силы, препятствующие упругому восстановлению тел. Иными словами, в области контакта и в ее окрестности действуют атомно-молекулярные силы – силы адгезии, на разрыв связей которых затрачивается часть упругой энергии возврата.

Таким образом, имеем последовательную цепочку явлений: деформация–упругий возврат, сопровождающиеся несовпадением нагрузочных и разгрузочных ветвей деформационных зависимостей, – рассеяние (потери) энергии на возврате в исходное состояние. В основе этих явлений лежит только адгезионное взаимодействие, так как другие факторы (такие, например, как внутреннее трение) экспериментально в явном виде не проявляются.

#### Диссипативно-демпфирующие свойства циклически сжимаемого контакта

Рассмотрим вторую часть демонстрируемой последовательности – рассеяние энергии и адгезию с целью установления связи между ними.

Важными факторами процесса контактирования являются демпфирующие свойства контакта, находящие отражение в величине рассеянной за цикл деформации энергии  $\Delta W$  и коэффициенте поглощения,  $\psi = \Delta W / W$ , где  $W$  – полная энергия деформации. Эти свойства двояко отражаются на работоспособности контактных пар. С одной стороны, рассеяние энергии может рассматриваться как положительный эффект, улучшающий динамические свойства оборудования. С другой стороны, рассеяние энергии является следствием отрицательных явлений молекулярного взаимодействия тел, приводящих к усталостным повреждениям поверхностей в результате образования зон сцепления. Рассеяние энергии и особенно коэффициент поглощения могут быть показателями интенсивности адгезионного взаимодействия. В то же время коэффициент  $\psi$  качественно определяет среднюю ширину петли гистерезиса. Как показывают опыты, рассеяние энергии  $\Delta W$  и коэффициент поглощения  $\psi$  зависят от сжимающей нагрузки  $q$ , физико-механических свойств материалов контактных пар, микрогеометрии поверхностей, площадей контакта, являющихся функциями  $q$ .

Используя методы контактной механики, можно рассчитать значения  $\Delta W$ ,  $W$  и  $\psi$ .

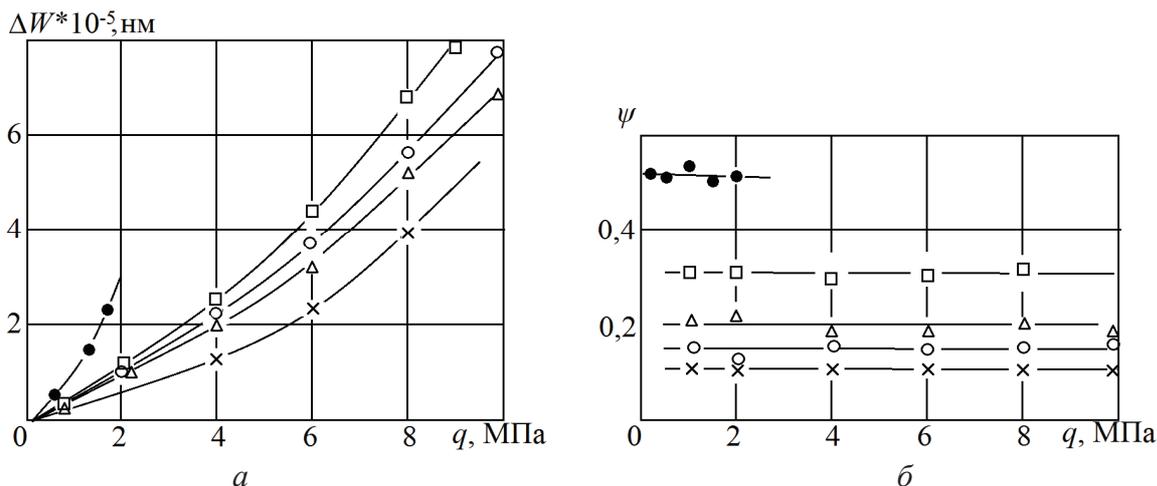


Рис. 2. Зависимости рассеяния энергии (а) и коэффициента поглощения (б) от нагрузки для различных контактных пар: о – сталь 45,  $Ra=0,78$  мкм;  $\Delta$  – медь,  $Ra=1,7$  мкм;  $\times$  – алюминий,  $Ra=4,5$  мкм;  $\square$  – свинец,  $Ra=6,2$  мкм;  $\bullet$  – индий,  $Ra=6,0$  мкм

Площадь петли гистерезиса, а следовательно,  $\Delta W$ ,  $\psi$  зависят от ряда геометрических факторов: ширины, определяющей степень несовпадения нагрузочных и разгрузочных линий, длины или величины деформации контакта и формы. Первый фактор зависит исключительно от среднего для всех взаимодействующих неровностей напряжения сцепления и их упругих констант. Второй и третий факторы определяются геометрией поверхностей, сжимаемыми и сдвигающими силами, физико-механическими свойствами поверхностных слоев и материала тел в целом.

Зависимости рассеяния энергии от величины внешней сжимающей нагрузки близки к параболическим (рис. 2, а) и качественно сравнительно мало различаются между собой для различных контактных пар. По мере увеличения сил рассеяние энергии возрастает. При средних и больших нагрузках зависимость  $\Delta W$  от амплитуды  $q_a$  близка к линейной. Подобный характер изменения  $\Delta W$  объясняется, во-первых, увеличением деформации контакта и, во-вторых, повышением прочности связи с ростом сжимаемых сил. Последний фактор приводит к возрастанию ширины петли, особенно существенному на средних участках деформационной зависимости ( $\delta$ - $q$ ).

Рассеяние энергии является мерой энергетических потерь в контакте. Как видно из графиков, оно весьма чувствительно ко многим параметрам, определяющим процесс контактирования. В этом отношении относительное рассеяние энергии представляет более инертную характеристику диссипативных свойств, но в то же время достаточно точно отражающую основные свойства взаимодействующих тел. Подобная малая чувствительность коэффициента связана с деформационными свойствами контакта. Изменения величины или характера деформации влияют на  $\Delta W$ . В то же время аналогичные изменения происходят с величиной потенциальной энергии упругой деформации  $W$ , кото-

рая обратно пропорциональна  $\psi$ . Следовательно, увеличение  $\Delta W$  при изменении деформации сопровождается возрастанием  $W$  и, как следствие, слабым изменением  $\psi$ . Изменение коэффициента поглощения на различных материалах показано на рис. 2, б. Несложно видеть, что амплитуда силы слабо влияет на  $\psi$ : в ряде случаев наблюдается некоторое увеличение  $\psi$  с ростом  $q_a$ , в других – слабое уменьшение. Иногда относительное рассеяние энергии снижается до некоторого значения  $q_a$ , а затем происходит возрастание. В целом из большого объема экспериментов можно сделать вывод о незначительном влиянии внешней силы на  $\psi$ , а для практического использования можно принять независимость  $\psi$  от  $q_a$ .

Так как в основу данных исследований положен адгезионный механизм контактного взаимодействия, то целесообразно полученные данные по рассеянию энергии сравнить с исследованиями по адгезии. Идентичность тех и других параметров будет подтверждением версии связи  $\Delta W$ ,  $\psi$  с адгезией. В связи с этим интересно отметить аналогию между экспериментами по исследованию  $\psi$  в нашей работе и опытами, проведенными по исследованию коэффициента адгезии на различных одноименных контактных парах [4, 5]. Было показано, что коэффициент адгезии  $K^*$ , равный отношению усилия отрыва одной поверхности от другой в случае адгезионного взаимодействия к усилию сжатия образцов, возрастает с уменьшением модуля упругости, твердости, температуры образцов, толщины пленок и т. п. В [5] приводится зависимость коэффициента адгезии от температуры плавления для различных контактных пар (рис. 3, пунктирная линия). Приводимый анализ данных по исследованию рассеяния энергии обнаруживает в одинаковых условиях (рис. 2, б; рис. 3) такое же изменение, как и в случае коэффициента адгезии. Например, как видно из рис. 3, зависимость коэффициента поглощения от температуры плавления

материала образцов идентична зависимости коэффициента адгезии.

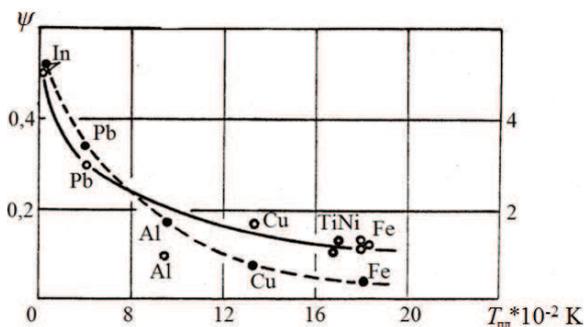


Рис. 3. Зависимость коэффициента адгезии  $K'$  (пунктирная линия) и коэффициента поглощения  $\psi$  от температуры плавления различных материалов

На рис. 2, б и 3 можно заметить, что точки для алюминия выпадают из указанной закономерности. Это обстоятельство, по нашему мнению, связано с прочностью окисной пленки на алюминии, которая в процессе деформации препятствует образованию контакта ювенильных участков. Кроме того, на пунктирной линии отсутствует  $K'$  для TiNi, т. к. в 60-е гг. этот материал был малоизвестен.

Теоретически связь между двумя этими процессами ( $\psi$  и  $K'$ ) можно представить следующим образом. Прежде всего, единая механика образования зон сцепления: образование физического контакта и физико-химическое взаимодействие между поверхностями. Далее коэффициент адгезии измерялся на последней стадии деформационного процесса, когда внешняя сжимающая нагрузка снята, и прикладывалось отрицательное (разрывающее) усилие. Промежуточные стадии разгрузки не учитывались. При этом большую роль играло упругое восстановление поверхностей, приводящее к разрушению участков сцепления [6]. Результатом явилось уменьшение  $K'$  вплоть до значений, близких к нулю (сила разрыва поверхностей была крайне мала) на твердых материалах. Однако на промежуточных стадиях разгрузки участки сцепления хотя и разрываются, но создают силу сопротивления (сцепления)  $P_{сц}$ , непрерывную на всей изменяющейся площади контакта в силу большого числа контактных пятен, которая фиксируется при изменении деформации в интервале  $q_o - q_a$ .

В результате действия силы сопротивления  $P_{сц}$  возник параметр  $q_{сц}$  — напряжение сцепления, который качественно не отличается от коэффициента адгезии. Доказано [2], что величины  $q_{сц}$  как подсчитанные с помощью экспериментальных значений ( $P_{сц}$ ), так и через усилие отрыва  $P_{отр}$ , одинаковы.

Таким образом, имеется две стороны процесса адгезионного взаимодействия: существование двойной деформационной зависимости при нагружении и разгрузке. Как следствие, существуют энергетические потери при существовании определенной силы сопротивления при разделении тел. Если прикладывать к адгезионному контакту отрывающее усилие, то разрыв на малоэластич-

ных материалах будет происходить не по всей площади, а на отдельных участках, последовательно вытягивающихся и разрушающихся. При этом получаются заниженные значения коэффициента адгезии, несмотря на значительную прочность связи в отдельных участках контакта. В связи с этим замерить какое-либо усилие отрыва для таких металлов как сталь, медь или алюминий не представлялось возможным. Однако оно существенно на образцах из индия, например, изменялось в пределах  $P_{сц} = 5 \dots 50$  Н в диапазоне сжимающих нагрузок  $P_{сж} = 50 \dots 200$  Н.

#### Адгезия в циклически сжимаемом контакте

Сформулируем условия возникновения адгезионных связей в герцевских упругом и упруго-пластическом (при малых глубинах внедрения) контактах. Контакт двух единичных микронеровностей будем моделировать контактом сферических сегментов. Один из них представляем как жесткое тело с конечным радиусом кривизны  $R_1$ , а другой —  $R_2 = \infty$ , т. е. фактически рассматривается классическая задача о внедрении сферического штампа в упруго-пластическое полупространство.

Существует две основные версии упругого контакта с адгезией применительно к сформулированной задаче: модель Дерягина–Мюллера–Топорова (ДМТ) и модель Джонсона–Кенделла–Робертса (ДКР) [7]. Первая из них предусматривает возникновение сил притяжения вне зоны контакта. Вторая модель базируется на представлении о бесконечно малом радиусе действия поверхностных сил, которые возникают в зонах физического контакта. С нашей точки зрения более корректной является модель ДКР, поскольку в модели ДМТ силы взаимодействия более слабые и не могут обеспечить должный уровень затрат энергии на разрыв связей.

В связи с возникновением адгезии при снятии нагрузки будет изменяться только  $\delta$ , а площадки контакта будет неизменной. Тогда в силу этого разгрузка будет происходить таким образом, как будто с полупространством взаимодействует своим основанием жесткий цилиндрический штамп (задача Буссинеску [7]). Поэтому результирующее давление будет равно сумме давлений по Герцу и Буссинеску.

На рис. 4 показано распределение давлений при их снижении на площадке контакта радиуса  $a$  по Герцу (линия 1), Буссинеску (2) и результирующее суммарное (3). Видно, что результирующее давление состоит из двух частей: сжимающие напряжения по площадке радиусом  $a'$  (верхняя часть кривой 3) и растягивающие в кольцевой области ( $a - a'$ ) на периферии (асимптотические ветви кривой 3). Таким образом, при нагружении напряжение определяется параболой Герца (1), а разгрузка сопровождается растягивающими напряжениями на периферии площадки контакта и разрывом адгезионных связей в этой области, что требует дополнительной энергии за счет упругого восстано-

вления и является причиной несовпадения нагрузочной и разгрузочной ветвей деформации (рис. 1).

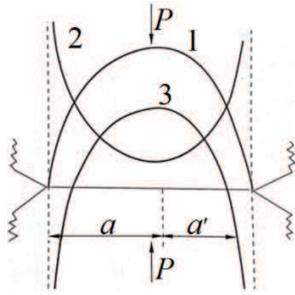


Рис. 4. Распределение нормальных давлений на адгезионном контакте

Используя модель ДКР, рассмотрим контакт однородных тел, в котором отсутствует проскальзывание. На рис. 5 показаны три стадии упругого контакта: начальное касание в точке (рис. 5, а), упругое внедрение (рис. 5, б) и стадия разгрузки (рис. 5, в). Видно, что при нагружении площадка контакта ограничивается линией  $ab$  (рис. 5, б), на которой возникают зоны сцепления, а при разгрузке – линией  $a'b'$  (рис. 5, в). На отрезках  $aa'$  и  $bb'$  произошел разрыв контакта и, следовательно, разрыв адгезионных связей. На линии  $a'b'$  эта связь сохранилась. В случае упруго-пластического контакта ряд повторных циклов нагружение–разгрузка приводят в конечном счете к упругой, но уже негерцевской деформации. Однако сохраняется та же последовательность в пределах упругих деформаций: образование и разрушение зон физического контакта на периферии контактной области и, соответственно, адгезионных связей. В контакте шероховатой и гладкой или двух шероховатых поверхностей существуют область стабильного сцепления и микрзоны, в которых адгезионный контакт нарушается при разгрузке.

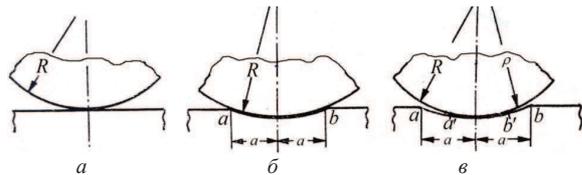


Рис. 5. Разгрузка шарового индентора: а) до нагружения; б) под нагрузкой; в) после разгрузки

Если контактирующие тела имеют различные упругие константы, то взаимное контактное давление вызывает различные тангенциальные смещения вдоль площадки контакта, в результате чего происходит проскальзывание на периферии, прилегающей к зоне стабильного сцепления контактной области (рис. 6). В этом случае периодические образования с проскальзыванием и разрыв адгезионных связей вызывают особый вид износа – фреттинг износа в кольцевой зоне на краях площадки контакта. Существование кольцевой зоны проскальзывания и фреттинг износа подтверждены в [3], и там же описано их образование в результате

фреттинга и усталостного разрушения. Глубина выработки в некоторых случаях превышает глубину лунки в центре площадки контакта.

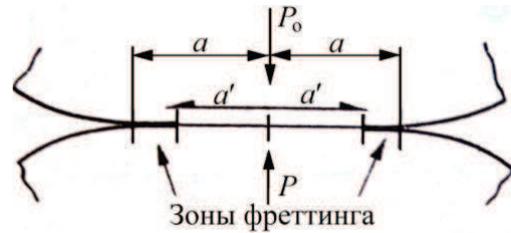


Рис. 6. Влияние профилей контактирующих тел на наличие зон проскальзывания и фреттинга

В осесимметричном контакте при увеличении нагрузки зона стабильного сцепления возрастает, охватывая зоны проскальзывания, в которых смещение прекращается.

#### Формирование петель гистерезиса, рассеяние энергии и адгезия материалов с памятью формы на основе никелида титана

Особенности поведения никелида титана в условиях дискретного контакта можно сформулировать следующим образом.

1. Качественного отличия в кривых нагружения не наблюдается; по характеру все они монотонно возрастающие  $\delta$  с увеличением нагрузки, как показано на рис. 7.
2. Количественные различия существенны в сравнении с вышеприведенными экспериментальными данными, а с теоретическими расхождение по никелиду титана составляет 100...120 %.
3. Обнаружено несущественное влияние микрогеометрии на кривые нагружения, тогда как для традиционных материалов с  $Ra=0,3$  и  $Ra=0,83$  мкм различие в  $\delta$  превышает 50 % (сталь).

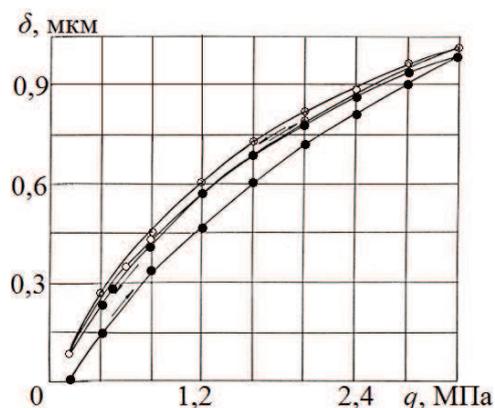


Рис. 7. Формирование гистерезиса при циклическом действии нормальной нагрузки. Контакт шероховатых поверхностей сплава ТН-1К,  $Ra=0,3$  мкм

4. При циклическом действии сжимающих сил пластическая деформация (в традиционных представлениях деформации) составляет малую долю от общей деформации, а замыкание

петли гистерезиса происходит уже на втором цикле нагружения. У прочих материалов оно происходит лишь на 6–8 цикле.

5. Демпфирующие свойства контакта тел из сплавов TiNi выше, чем у обычных материалов, что видно по ширине петель гистерезиса тех и других материалов.
6. Стабилизация параметров рассеяния энергии наступает уже на четвертом цикле нагружения.
7. Важно отметить, что влияние адгезионного взаимодействия на демпфирующие свойства контакта из никелида титана незначительно. Это подтверждено экспериментами с использованием тангенциальных срывов (условия трения скольжения), существенно влияющих на свойства контакта обычных материалов.

Отмеченные отличия контактного взаимодействия никелида титана можно объяснить лишь с позиций фазовых превращений под нагрузкой. При этом следует считать, что в отличие от контактирования пластических материалов, где микронеровности испытывают лишь деформационное упрочнение, в контакте из никелида титана на разных уровнях сближения материал может находиться в различных состояниях. Это могут быть

однофазное – исходное, двухфазное – мартенсит-аустенитное состояние, мартенситное (в областях прилегающих непосредственно к контакту) и высокопрочное, сложные с точки зрения механических свойств состояния.

#### Заключение

Установлена связь между рассеянием энергии в контакте материалов, определяемым параметрами петли гистерезиса, и адгезионным взаимодействием на площадках физического контакта при его циклическом сжатии. Показано, что в условиях сцепления (адгезии) на контакте отдельных микронеровностей распределение давлений при снятии сжимающей нагрузки отличается от традиционного использования теории упругого контакта Герца: на периферии контактной области возникают растягивающие напряжения, приводящие к несовпадению нагрузочных и разгрузочных деформационных зависимостей и образованию петель гистерезиса.

Отмечены особенности формирования петель в дискретном контакте тел из никелида титана, что объясняется сложным структурно-фазовым состоянием поверхностей, связанным с возникновением мартенсита деформации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хохлов В.А., Потекаев А.И., Галсанов С.В. Исследование поверхностей трения материалов с памятью формы на основе никелида титана // Технические науки: Труды I Междунар. научно-техн. конф. – Йошкар-Ола, 2012. – С. 83–85.
2. Хохлов В.А., Сикорский Д.Ю., Катапухина С.Л. Трение и изнашивание никелида титана // Современные проблемы машиностроения: Тр. II Междунар. конф. – Томск, 2004. – С. 102–104.
3. Карасик В.А. О накоплении пластических остаточных деформаций в условиях пульсирующего контактного нагружения // Машиноведение. – 1973. – № 3. – С. 88–92.

4. Keller D.V. Adhesion between solids metals // Wear. – 1963. – V. 6. – P. 64–68.
5. Sikoraky M.E. The adhesion of metals and the factors that influence it. Bell Telephone Laboratories // Wear. – 1964. – V. 7. – P. 74–78.
6. Bowden F.P., Rowe G.W. The adhesion of clean metals // Proceeding of the Royal Society. – 1956. – 233A. – № 1195. – P. 18–22.
7. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка и износ. Физические основы и технические приложения трибологии. – Изд-во: ФИЗМАЛИТ, 2007. – 368 с.

*Поступила 28.09.2012 г.*