

УДК 669:621.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯХ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ

В.А. Хохлов, А.И. Потехаев\*, С.В. Галсанов

Томский государственный университет

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

E-mail: potekaev@spti.tsu.ru

В результате изучения окружной прочности и рассеяния энергии в термомеханических соединениях трубопроводов втулками из никелида титана получены изменения напряжений во времени. Разработаны методы повышения их надежности.

### Ключевые слова:

Никелид титана, термомеханические соединения, релаксация напряжений.

### Key words:

Titanium nickelide, thermomechanical connections, stress relaxation.

### Введение

Термомеханические соединения (ТМС) – это соединения, в которых натяг между элементами осуществляется за счет термического сжатия предварительно нагретой втулки или расширения предварительно охлажденного вала. Это требует точного расчета размеров втулки и вала.

Задача создания надежных и высокопрочных соединений значительно упрощается при использовании материалов с памятью формы (ПФ), в частности на основе никелида титана. В отличие от обычных материалов никелид титана, обладая высокими – до 12...15 % – обратимыми деформациями, позволяет создать натяг, соизмеримый с прочностными характеристиками материалов самих соединяемых элементов при относительно невысоких точности и качестве поверхностей [1–4].

Один из вариантов такого соединения показан на рис. 1. Здесь концы трубопроводов – 2, выполненных из любого материала, соединяются втулкой – 1 из никелида титана. Для обеспечения большей прочности и надежности втулка выполнена с поясками. Процесс сборки включает в себя этап радиальной раздачи втулки при низких температурах, например, в среде жидкого азота, этапа свободной насадки втулки на концы трубопроводов при комнатной температуре и этапа ее термовозврата. В процессе разогрева за счет проявления эффекта ПФ радиальные размеры втулки уменьшаются почти до исходных, в результате чего происходит обжим концов. Величина натяга в данном случае обусловлена разностью исходных посадочных размеров труб и втулки, а сборочный зазор и свобода сборки обеспечиваются большими степенями раздачи в пределах указанных выше обратимых деформаций.

Термомеханические соединения широко используются в гидравлических, газовых и топливных системах двигателей, где требуется компактность трубопроводов со сложной траекторией их расположения, например в двигателях самолетов [5] и подводных лодках, а также есть возможность

их широкого применения в системах трубопроводов нефтеперерабатывающих заводов [6, 7].

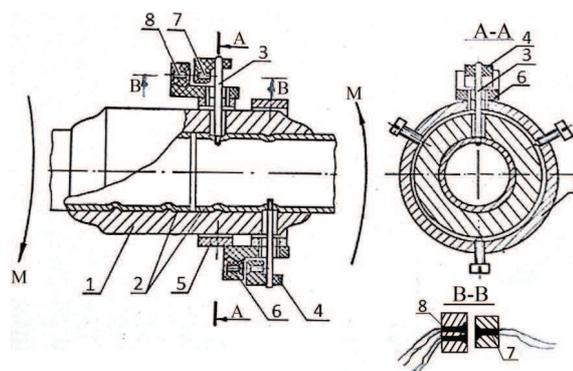


Рис. 1. Термомеханическое соединение трубопроводов. 1 – втулка из TiNi, 2 – соединяемые трубопроводы, 3 – шток для установки кронштейна, 4 – кронштейны со светодиодами, 5 – кольцо для крепления кронштейнов, 6 – кронштейны для крепления фотодиодов, 7 – светодиод, 8 – фотодиоды

По статистическим данным Республиканского инженерно-технического центра (РИТЦ) ТФ СО АН СССР (см. отчет РИТЦ по теме «Создание на основе сплавов с памятью формы технологии и оснастки несварных соединений трубопроводов» шифр Криофит № 28/98 от 29.05.89) нефтеперерабатывающий завод производительностью 6 миллионов тонн в год имеет протяженность трубопроводов до 2000 км диаметрами от 6 до 1200 мм и сотни тысяч стыков, значительное число которых являются сварными. Как известно, во водимых мощностях число отказов из-за сварных соединений составляет 40...45 % от общего числа отказов всех систем, а в процессе эксплуатации доля их составляет 11 %. Поэтому вполне оправдан поиск альтернативных способов соединений, в число которых входит ТМС. Преимущества таких соединений очевидны:

- возможность соединения трубопроводов из различных материалов;
- простота и легкость сборки;

- возможность сборки в труднодоступных местах;
- отсутствие высокотемпературного нагрева, который неизбежен при пайке и сварке, исключается изменение и ухудшение свойств материала в области стыка;
- высокая надежность соединений (до 700 МПа), т. к. никелид титана, имея повышенную прочность (предел текучести у него выше, чем у обычных материалов), обладает высокой долговечностью в условиях циклического нагружения и пульсирующих нагрузок;
- возможно соединение в полевых условиях при ремонтных и капитальных работах при отсутствии источников энергии;
- возможность проведения работ во взрыво- и пожароопасных условиях.

Недостатком этих соединений является относительно высокая стоимость материала.

Однако, как показывает технико-экономический анализ, проведенный РИТЦ, затраты на подготовительные работы, доставку материалов и оборудования к месту сборки, эксплуатацию оборудования и непосредственно на монтаж ТМС ниже, чем производство сварных соединений. При этом общая стоимость с учетом затрат на материалы становится почти одинаковой для обоих видов соединений. Но учитывая указанные выше преимущества ТМС, эффективность их неоспорима (данные РИТЦ).

Наиболее оптимальными с точки зрения экономичности и востребованности размеры соединяемых трубопроводов авторы считают диаметры 14...52 мм. Достаточно сказать, что только на одном самолете США F14A в гидравлических системах устанавливается 800 муфт, обеспечивающих давление 210 МПа, а с 1973 по 1983 гг. было поставлено для авиации 35 тыс. муфт. В газовых системах и системах подачи пресной и морской воды подводных лодок соединения ТМС из никелида титана выдерживают давление 420 МПа. На гражданских объектах перспективы применения ТМС колоссальны.

Термомеханическое соединение, как видно, включает контакт тел классических материалов (трубопроводы) с материалом с ПФ (соединительная втулка). Причем здесь в наличии все атрибуты контактного взаимодействия, трения, предварительного смещения, изнашивания.

В самом деле, в указанных выше системах реализуются статические контактные деформации в результате натяга при сборке соединений, радиальные и тангенциальные смещения при действии давления жидкости и газов, цикличность однозначная и знакопеременная по нагрузкам.

Для оптимизации характеристик ТМС и повышения их долговечности нами были проведены обширные исследования свойств контакта никелида титана с традиционными материалами, релаксационных характеристик соединений, и на основе исследований выработаны рекомендации для по-

вышения эксплуатационных характеристик термомеханических соединений.

Результатом этой работы явилось внедрение в производство оптимальной и конкурентоспособной технологии создания ТМС на основе никелида титана с высоким экономическим эффектом.

#### Материалы, образцы, приборы и оборудование

Механические и кинетические характеристики (прочность, герметичность, долговечность, релаксация, ползучесть) соединений с использованием материалов с термомеханической памятью формы определяются материалами соединяемых труб, их поперечными размерами, конструкцией соединения (гладкие с уплотняющими плоскими элементами, комбинированные с промежуточными элементами), размерами соединительных муфт, допусками на наружные и внутренние диаметры элементов соединения, степенью предварительной раздачи втулки, расчетным натягом и, в наибольшей степени, материалом соединительных муфт.

Для обеспечения заданных характеристик соединения по герметичности, релаксационностойкости, прочности, долговечности и рабочему интервалу температур был выбран материал соединительной втулки с повышенными термомеханическими характеристиками  $Ti_{50}Ni_{47,5}Fe_{2,5}$  ТН-1К с температурами начала  $M_n$  ( $-80^\circ C$ ) и конца мартенситного превращения ( $-140^\circ C$ ), коэффициентом восстановления не менее 95 %.

Выбор этого сплава обусловлен достаточно низкими температурами формовосстановления, ростом параметров прочности и пластичности с повышением температур до 300...350  $^\circ C$ , высокими значениями (до 15 %) обратимой деформации, а главное тем, что ТН-1К единственный из материалов с памятью формы, достаточно полно изученный и освоенный промышленностью [5].

Термообработка: отжиг в вакууме при  $T=800^\circ C$  с выдержкой 1 час в печи. Конструкция втулки – с четырьмя уплотняющими поясками.

Трубопроводы: нержавеющая сталь 12X18H10T с наружным диаметром 14 и 20 мм и толщиной стенок 1 мм.

Уплотняющие пояски деформируют при обжатии стенки трубы, и внутренние их поверхности имеют волнообразный профиль (рис. 1).

Измеритель перемещений – прибор на основе оптического бесконтактного способа измерения перемещений с применением фотодиодных датчиков микроперемещений, установка [7] и работа которых описана в следующем разделе.

Для создания крутящего момента использовалась машина для испытаний на кручение фирмы «Амслер–Лафон».

Измерение площади петель гистерезиса и энергии псевдоупругой деформации проводилось с помощью планиметра.

Сборка соединений проводилась следующим образом: втулка из TiNi помещалась в среду жидкого азота в специальную камеру, раздавливалась

по диаметру металлическим дорном, извлекалась из камеры и сразу насаживалась на концы трубопроводов. При ее нагреве втулка, возвращаясь к прежнему расчетным размерам, обжимала концы трубопроводов.

#### Методика исследования релаксации напряжений

Под релаксацией напряжений понимают самопроизвольное снижение во времени механических напряжений в материале при постоянных линейных размерах элемента. Релаксация происходит за счет возникновения микропластических деформаций в локальных областях материала при действии упругих напряжений, уменьшая последнее.

Поскольку все количественные теоретические и экспериментальные методы определения напряжений базируются на определении смещения между отдельными элементами материала, то и экспериментальное исследование релаксации напряжений сводится в той или иной форме к определению изменений во времени перемещений или деформаций при упругом возврате после снятия напряжений. Используется классический аппарат механики деформируемого твердого тела.

Экспериментальное исследование релаксации напряжений возможно при различных схемах нагружения: изгибе, растяжении, кручении, сжатии, комбинированном виде нагружения. Все они имеют свои преимущества и недостатки. Например, в одном случае возможно точное определение кинетики деформации, но сложный математический аппарат пересчета в напряжения, в других случаях связь между деформациями и напряжениями выражается, например, в виде простейшего закона Гука, однако сложно зафиксировать изменение деформации.

В термомеханических соединениях после сборки элементов в результате фазового превращения и формовосстановления во втулке и трубах возникают осевые и радиальные напряжения, обеспечивающие определенные натяг, герметичность и прочностные характеристики соединения.

Поставленная задача исследования релаксации напряжений в соединении является намного более сложной, чем определение кинетики напряжений в материале по ряду причин. *Во-первых*, общая релаксация напряжений определяется релаксацией собственно в материале втулки, релаксацией в материале труб и релаксацией в зоне контакта. Причем последняя, как показали наши исследования, в начальный момент времени интенсивней, чем в материалах, и именно она определяет в наибольшей степени процессы разупрочнения соединения. Это связано с тем, что в контакте ввиду малости площадей касания возникают напряжения, близкие к предельным, даже при весьма малых общих расчетных напряжениях, действующих в элементах. Следовательно, и интенсивность релаксации выше.

*Во-вторых*, возникает проблема точного измерения деформаций и в материалах, и в контакте,

фиксирования их изменений во времени, принимая во внимание, что последние являются малыми высших порядков по сравнению с самими деформациями и требуется измерительная аппаратура с точностью на класс выше определяемых величин. Кроме того, необходимы сложные вычисления для расчета напряжений по деформациям, требующие анализа напряженно-деформированного состояния в зоне контакта, установления аналитической связи между деформациями и напряжениями, учета целой гаммы эмпирических коэффициентов, использования гипотез и допущений. В настоящее время такой, хотя и сложный, математический аппарат обработки экспериментально полученных деформаций и расчет напряжений разрабатывается авторами.

*В-третьих*, на характеристики соединения оказывают влияние два конкурирующих процесса. Первый из них – снижение напряжений во времени в результате релаксации, приводящее к понижению прочности, так как уменьшается усилие обжатия или натяга. Второй – это увеличение площади фактического контакта, происходящее в результате эффектов ползучести микронеровностей под напряжением. Ползучесть локальных областей контакта сопровождается, кроме того, адгезионными процессами и усилением механического сцепления. Все это приводит к упрочнению контакта и соединения в целом.

Однако увеличение фактической площади сопровождается падением контактных давлений. Для опытных соединений с натягом падение фактического контактного давления незначительно, так как деформация от ползучести тут же компенсируется деформацией упругого возврата втулки и трубы.

В термомеханических соединениях могут быть две ситуации, определяющие прочность и герметичность соединения. В одном случае, когда скорость ползучести контакта превышает скорость релаксации напряжений в материале втулки и трубы, прочность соединения не уменьшается, так как успевает произойти компенсация деформации за счет упругого восстановления. В другом случае, когда скорость релаксации в самом материале выше скорости ползучести контакта, рост фактической площади контакта, который сопровождается уменьшением фактического контактного давления, будет происходить в условиях уменьшения номинального контактного давления вследствие релаксации напряжений. При этом прочность соединений должна уменьшаться.

В обоих случаях прочность соединения зависит не только от разности скоростей, но и от величины релаксируемых напряжений и от величины изменяющейся фактической площади, т. е. от способности контакта к ползучести. Так, для поверхности с низким качеством обработки (с большой шероховатостью) величина прироста фактической площади касания из-за ползучести будет больше, чем для поверхностей более гладких.

Таким образом, рассматривая ТМС с позиций механики контактного взаимодействия, можно утверждать, что кинетика прочности соединения определяется не только релаксацией напряжений в теле элементов, но и в большей степени кинетикой микрометрических характеристик контакта и объема материала в шероховатом слое. Поэтому исследования релаксации в соединениях, имеющие цель – прогнозирование прочности, должны быть сведены к изучению кинетики контактных напряжений и прочности, которые учитывают как собственно временные изменения свойств контакта, так и релаксацию напряжений в материале.

Известные способы определения релаксации в материалах неприемлемы для соединения. Методик оценки релаксации напряжений в соединениях и в контакте, судя по литературным данным, не существует. В связи с этим предлагается новый метод оценки релаксации напряжений в соединениях и в ТМС в частности, где в качестве критериев оценки релаксационных свойств приняты изменения окружной прочности соединения и энергетической характеристики соединения – рассеяние энергии в трибосопряжении за цикл знакопеременного нагружения крутящим моментом. Величина последнего должна быть такой, чтобы исключить дополнительные контактные деформации, т. е. чтобы контакт работал в условиях предварительного смещения. Рассеяние энергии определяется по площади гистерезисной петли. Третьим равноценным критерием может быть изменение во времени при фиксированном предельном крутящем моменте величины предварительного смещения, которое отражает степень сопротивления контакта внешним силовым воздействиям. Поскольку существует связь, хотя и нелинейная, между смещением и рассеянием энергии, третий критерий в данной работе не рассматривается.

При исследовании микроперемещений и диссипативных свойств контакта в условиях предварительных смещений необходима регистрация микроперемещений, составляющих сотые доли микрона.

В связи с этим изготовлен прибор на основе фотодиодных датчиков микроперемещений.

На рис. 1 приведена схема установки датчиков. Один элемент датчика (светодиод) 1 устанавливается по одной из трубок. Второй элемент (два фотодиода) 2 закрепляется на втулке таким образом, чтобы элемент 1 располагался симметрично относительно фотодиодов.

При возникновении деформации в контакте луч света от светодиода смещается в сторону одного из фотодиодов, изначальная равномерность светового потока нарушается, появляется ток разбалансировки на выходе фотодиодов, который фиксируется токоизмерителем, протарированным на линейное микросмещение.

Для создания микросмещений к концам трубопроводов прикладывался крутящий момент. При

этом возникало предварительное смещение правой трубки относительно втулки, которое фиксировалось датчиками. Увеличение амплитуды момента велось до наступления проскальзывания (срыва) соединения.

#### Релаксация напряжений в термомеханических соединениях

На рис. 2 представлены петли механического гистерезиса в различных точках контакта термомеханического соединения. На основании анализа данных зависимостей и результатов исследований, проведенных ранее, можно сделать вывод, что процессы, происходящие в плоском контакте в условиях высоких нормальных давлений под действием сдвигающих сил, и процессы, происходящие в контакте термомеханических соединений под действием крутящих моментов, качественно идентичны. Это легко доказывается тем, что, выделив условно в цилиндрическом контакте малую площадку, представляющую в пределе плоскость, можно увидеть, что нормальной нагрузкой являются радиальные силы от напряжений упругого возврата втулки, а сдвигающими – силы от действия крутящего момента; т. е. получим схему, полностью эквивалентную плоскому контакту. Поэтому при теоретическом описании контакта в отмеченных соединениях достаточно рассмотреть условия деформирования плоского контакта. В силу малых перемещений относительно радиуса соединения геометрией стыка можно пренебречь.

Результаты исследования предельной силы сдвига от времени после сборки соединения представлены на рис. 3. На данных графиках показано, что окружная прочность соединения независимо от времени после сборки в пределах исследуемых 2500 часов почти постоянна. Разброс экспериментальных данных не превышал 10 %.

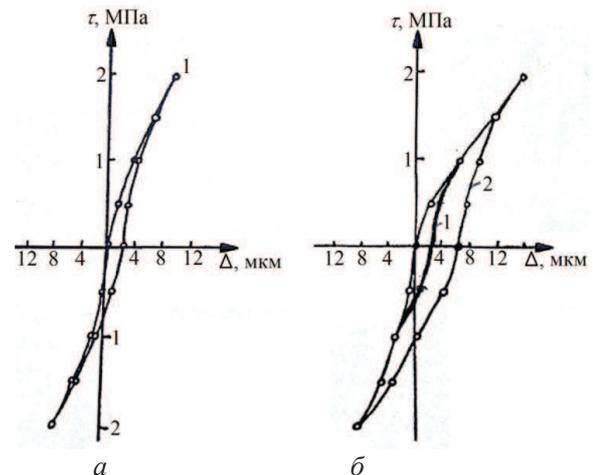


Рис. 2. Петли гистерезиса при деформации в окружном направлении: а) левый датчик,  $\tau=2$  МПа; б) правый датчик, петли: 1 –  $\tau_{\max}=1$  МПа, 2 –  $\tau_{\max}=2$  МПа

Поскольку предельные сдвигающие силы и рассеяние энергии являются очень чувствительными характеристиками контактного взаимодействия

тел, отражающими и напряжения, и прочность, и жесткость, и их кинетику, то можно с уверенностью сказать, что в рассмотренном интервале времени изменение напряженного состояния незначительно и не фиксируется в опытах. Фактически это изменение должно проявляться наиболее сильно в начальный после сборки период времени (часть этого изменения удалось зафиксировать – см. левую сторону графика). Однако методика измерения микроперемещений, требующая установки датчиков, настройки аппаратуры, установки в крутильную машину, позволяла провести измерения не ранее, чем через 40...60 мин после сборки. Далее, если предположить, что релаксация все же есть, то увеличение податливости контакта в результате релаксации напряжений должно компенсироваться уменьшением податливости из-за ползучести, увеличением фактической площади контакта и образованием адгезионных связей в зонах контакта.

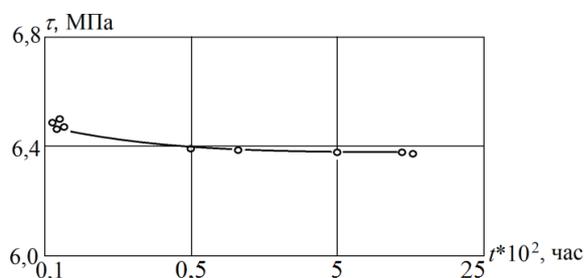


Рис. 3. Зависимость предельной силы сдвига от времени после сборки ТМС

Учитывая накопленный авторами опыт эксплуатации соединения в экспериментальных целях (при исследовании контактного взаимодействия пар-труба-втулка, микротрения в контакте, предварительного смещения и релаксации), можно рассмотреть несколько вариантов повышения надежности ТМС. При этом под надежностью понимаем обеспечение заданных герметичности, прочности в условиях действия статических и циклических нагрузок, а также долговечности в заданном временном интервале.

1. Повышение характеристик соединения за счет предварительного приложения крутящего момента, вызывающего микросмещение, близкое к предельному. Происходит упрочнение локальных контактных зон за счет наклепа материалов в приконтактных областях и усиления адгезионных связей в зонах физического контакта. Это положение подтверждается экспериментально и является одним из способов повышения жесткости соединений, включая и соединения с натягом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Escobar J.C., Clifton R.J. On pressure-shear plate impact for studying the kinetics of stress-induced phase transformations // *Materials, Science and Engineering*. – 1993. – V. 170. – P. 125–142.
2. Комиссарова Н.П., Тертюк С.В., Хохлов В.А. Никелид титана – эффективный материал для элементов ТМС трубопрово-

2. Повышение характеристик за счет улучшения качества обработки рабочих поверхностей втулки и труб. Известно, что с уменьшением высоты микронеровностей увеличивается нормальная и тангенциальная жесткости контакта. При этом уменьшается объем контактного зазора, и соответственно возрастает объем материала, испытывающего предельные напряжения. Уменьшение высоты микронеровностей приводит к снижению интенсивности кинетических процессов – релаксации и ползучести.
3. Повышение характеристик ТМС можно достичь путем увеличения количества поясков на втулке. В первом приближении можно считать, что увеличение прочности соединения пропорционально числу рабочих поясков. В этом случае лимитирующим фактором может оказаться прочность трубы вне зоны соединения.
4. Немаловажным методом повышения надежности может служить выбор материала трубы по прочностным параметрам упрочняемости и пластическим свойствам, а также толщины стенок. Однако в этом случае зачастую выбор размеров и материала труб определяется конструктивными соображениями, экономичностью систем и условиями эксплуатации.
5. В случае заданных параметров труб для тонкостенных конструкций целесообразно использовать так называемые втулки жесткости, которые устанавливаются внутри трубопроводов и тем самым увеличивают жесткость соединения.

#### Заключение

В качестве критериев оценки релаксационных свойств приняты изменения окружной прочности соединений и их энергетической характеристики – рассеяние энергии в контакте втулка-трубопровод. Показано, что в измеряемом интервале времени (1...2500 ч) в начальный период времени (1...50 ч) наблюдается некоторое снижение прочности, затем прочность стабилизируется. Однако некоторые элементы релаксации в течение времени все же есть, но разупрочнение, вызываемое ею, должно компенсироваться уменьшением податливости контакта в результате ползучести, увеличения площади фактического контакта, образованием адгезионных связей в этих зонах, а также за счет упругого довосстановления материалов втулки и труб.

Разработано несколько рекомендаций, предназначенных для повышения надежности соединений, таких как герметичность и прочность.

- дов // Проблемы геологии и освоения недр: Тр. III Междунар. науч. симпозиума. – Томск, 1999. – С. 301–302.
3. Вестбрук Д.К. Интерметаллические соединения. – М.: Металлургия, 1970. – 438 с.
  4. Тихонов А.С., Герасимов А.П., Прохорова И.И. Применение эффекта памяти формы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1981. – 81 с.

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 Международ. 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 микроповерхностей 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-