

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ХН65ВМТЮ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Флат М.Х – аспирант, Куранаков С.Я. – к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Работоспособность элементов машин и механизмов в значительной мере зависит от уровня описания процессов деформирования и разрушения, происходящих в используемых материалах. В ряде конструктивных элементов, в таких как лопатки и диски газовых турбин, работающих при температурах до 1000 °С и более, в процессе эксплуатации возникает необратимая деформация. Рост во времени такой деформации может привести к разрушению элементов конструкции или даже самой конструкции.

Для оценки работоспособности материала в условиях ползучести необходимо располагать методами расчета, учитывающими реальные условия эксплуатации данного изделия.

В рамках исследования были сопоставлены три расчетных метода описания кривых ползучести, представленных в работах [1-3], с экспериментально полученными кривыми жаропрочного сплава ХН65ВМТЮ (ЭИ893).

Сплав на никелевой основе ХН65ВМТЮ широко применяется в газотурбостроении, а именно для изготовления рабочих и направляющих лопаток, а также крепежных деталей газовых турбин, с длительным сроком службы при температуре до 800 °С.

Испытанию на ползучесть при линейном и плоском напряжённом состоянии подвергались трубчатые образцы с внешним диаметром 18,5 мм, длиной рабочей части 50 мм и толщиной стенки 1 мм. Все режимы нагружения задавались в истинных значениях напряжений, для чего производилась корректировка действующей нагрузки на образец [4].

Экспериментальные кривые ползучести, полученные при линейном растяжении, отвечают уровням напряжений от 250 до 400 МПа. Каждая кривая построена по результатам испытаний 3-4 образцов, которые доводились до полного разрушения. Эксперименты показали, что на уровнях истинного напряжения 250 и 300 МПа кривые ползучести включают в себя все три характерных участка неустановившейся, установившейся и ускоренной ползучести. Но необходимо отметить, что стадия ускоренной ползучести занимает значительно больше времени, чем две остальные. На более высоких уровнях стадия неустановившейся ползучести отсутствует.

В работе [1] в качестве меры упрочнения рассматривается работа напряжений, действующих на деформациях ползучести. Основываясь на этом положении, нами предлагается рассматривать кривые в координатах: удельная рассеянная энергия A – напряжение σ . Расчёт производится следующим образом. Строится прямая, соединяющая параметры A_1 и A_2 двух экспериментальных кривых, принимаемых за базовые, по которой определялся параметр A искомой кривой. Для проверки в качестве неизвестной кривой принималась одна из экспериментальных. Точки искомой и базовых кривых рассматривались в один момент относительного времени τ/τ_p . Под τ_p необходимо понимать как время до разрушения образца.

Расчёт по методике [1] показал, что расчетные и экспериментальные кривые ползучести имеют удовлетворительную сходимость.

Вторая методика, предложенная в [2], основана на предположении о том, что процесс ползучести реализуется термоактивным путём. Для этого используется зависимость, связывающая интенсивность напряжений с интенсивностью скорости деформации установившейся ползучести. В рамках исследования была предпринята попытка использования данной зависимости для расчёта всех стадий ползучести с помощью относительного времени.

Полученные результаты показывают, что предложенное авторами [2] соотношение достаточно точно описывает кривые ползучести сплава ХН65ВМТЮ при высоких уровнях напряжений. Для напряжений ниже 350 МПа результаты расчёта значительно расходятся с экспериментом. Вероятно, это связано с тем, что авторы проводили исследования только для установившейся ползучести, и рассмотренный вариант не подходит для описания других стадий.

Для писания кривых ползучести в работе [3] рассматривается методика, согласно которой за меру интенсивности процесса ползучести принимается удельная мощность рассеяния W , а за меру повреждённости материала – удельная энергия рассеяния A . Построенное уравнение состояния связывает эти два параметра. Применительно к рассматриваемому сплаву уравнение состояния было модифицировано. Кривые ползучести, полученные в результате расчёта с применением модифицированного уравнения, оказались наиболее близкими к экспериментальным.

При испытаниях в условиях плоского напряженного состояния (растяжение с одновременным кручением) и стационарного нагружения были получены кривые ползучести при напряжениях от 300 до 400 МПа. Отношение касательного напряжения к нормальному составляло $\kappa=0,77$. Сравнивая кривые ползучести при линейном ($\kappa=0$) и плоском напряженном состоянии, можно отметить, что вид напряженного состояния значительно влияет на скорость вязкопластического деформирования, причем с ростом κ скорость ползучести уменьшается. При плоском напряженном состоянии наблюдаются те же закономерности деформирования и разрушения, что и при линейном растяжении, т.е. преобладает третья стадия ползучести, предельная деформация ползучести падает с понижением уровня действующих напряжений, разрушение происходило без образования шейки.

Так же как и при линейном напряженном состоянии, при плоском были построены расчетные кривые ползучести по методикам, представленным в работах [1-3]. Проведённое исследование показало, что из рассмотренных методик лучшее совпадение с данными эксперимента при плоском напряжённом состоянии даёт использование методики, предложенной в работе [3].

На основании результатов расчёта можно сделать вывод о том, что наиболее подходящим для описания кривых ускоренной ползучести рассматриваемого жаропрочного сплава в случаях линейного и плоского напряженного состояния является метод, основанный на предлагаемых в [3] зависимостях.

Литература

1. Работнов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
2. Андронов, И.Н. Экспериментальные методы оценки скорости ползучести и долговечности металлоконструкций при сложном напряжённом состоянии [Текст] / И.Н. Андронов, С.Г. Аленников, Н.П. Богданов, Э.Г. Майорова, Ю.А. Теплинский // Материаловедение.– 2003. – №8. – С. 17-20.
3. Закономерности ползучести и длительной прочности. Справочник [Текст] / Под. общ. ред. С.А. Шестерикова. – М.: Машиностроение, 1983. – 101 с..
4. Куранаков, С.Я. Описание процесса ползучести и длительной прочности при линейном и сложном напряжённом состоянии [Текст] / С.Я. Куранаков. – Барнаул, 2003. – 15 с. Деп. в ВИНТИ 06.11.2003, № 1918–В2003.

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОЙ ПРОЧНОСТИ НА РАБОТУ УСЛОВНО-НЕПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Вольных А.П. – студентка, Котенёва Н.В. – к.т.н., доцент,
Алтайский Государственный Технический Университет

В настоящее время в машиностроении очень мало внимания уделяют точности расчета условно-неподвижных соединений с учётом контактной прочности, тем самым подвергая конструкцию к перегрузу и быстрому изнашиванию.

Контакт – это взаимодействие поверхностей в ограниченной области, а взаимодействие поверхностей проявляется в формировании пятен касания. При соединении и разъединении

контактов деформируется лежащий под ними материал. Поверхностные слои трущихся материалов изменяются, в основном, под действием деформаций. Наиболее распространенный вид контактной задачи – это задачи с учётом сил трения. Такое взаимодействие обусловлено фрикционными связями. Фрикционные связи – это пятна касания, которые образуются, существуют и исчезают при совместном действии нормальных и тангенциальных сил. Вид нарушения фрикционной связи зависит от относительного внедрения $\frac{h}{R}$ и относительной прочности адгезионной связи $\frac{\tau}{\sigma_s}$, возникающей между плёнками, покрывающими поверхности твердых тел, или самими телами, если пленки удалены.[1]

Граничные условия в области контакта Ω , где имеет место трение поверхностей, формулируется следующим образом: $u_z = \delta - h(x, y)$; $\tau_{zx} = \Phi_x(\sigma_z)$; $\tau_{zy} = \Phi_y(\sigma_z)$, т.е. задаются перемещения u_z , направленные по нормали к области контакта и определяемые формулой зазора $h(x, y)$ между телами в недеформированном состоянии, и определяемые законом трения зависимости касательных напряжений τ_{zx} и τ_{zy} от напряжений σ_z , действующих по нормали к поверхности.[2] Но реальные поверхности в действительности дискретны вследствие существования поверхностного микрорельефа. Для изучения влияния микрорельефа поверхности на напряженно-деформированное состояние приповерхностных слоёв тел, находящихся в контактном взаимодействии, необходимо решать задачу множественного контакта, т.е. смешанную задачу механики деформируемого твёрдого тела для системы пятен касания, составляющих фактическую область контакта поверхностей. Для теории контакта реальных поверхностей используются модели, параметры которых не задаются заранее, а определяются на основе экспериментального изучения микротопографии и физико-механических свойств поверхностей. Тут же применим метод Н.Б. Демкина.

В основе расчета прочности по контактным нагрузкам лежат решения математической теории пластичности (решение задачи о вдавливании плоского пуансона в пластически однородную полуплоскость; решения аналогичных задач для пластически неоднородной среды), обобщающее решение Прандтля. При расчете контактной прочности по предельным нагрузкам используют нормальные контактные давления p_c^* , называемые основными или базовыми предельными контактными давлениями. Они определяются с учётом фактического распределения контактных сил трения, начальной формы контактирующих тел, с учётом геометрии и размеров контактных площадок.

Формула определения p_c^* для шероховатой опорной поверхности выглядит следующим образом: $p_c^* = \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right) f \left(\frac{B}{h} \right) \right]^{-1} p_{cr}$, где p_{cr} - расчётные предельные контактные напряжения, f - коэффициент трения, h - толщина тела, B - ширина контактной площадки [3].

При наличии сил трения происходит микросдвиг по плоскости взаимодействия.

Экспериментально с помощью метода предварительных смещений на одних и тех же соединениях в статических условиях доказано, что при наличии осевого сдвигающего усилия закономерности смещения при сложном нагружении сохраняются. Так, например, наличие схватывания в прессовых соединениях, при малых сдвигающих условиях уменьшает рассеяние энергии. С увеличением усилий роль схватывания ослабевает за счет нарушения связей.[4]

Лишь комплексное рассмотрение методов решения контактных задач позволит наиболее точно оценить склонность конструкции к деформации под действие сил трения, относительной прочности адгезионной связи и относительного внедрения $\frac{h}{R}$. Таким образом, суммируя

все полученные результаты, можно будет дать точную оценку контактной прочности условно-неподвижных соединений.

Список литературы

1. Карагельский И.В. Трение и износ. М., изд-во «Машиностроение», 1968, 480стр.
2. Трение, износ, смазка. Изд-во «Машиностроение»
3. Третьяков Е.М. Влияние относительного размера контактных площадок на величины предельных напряжений и контактную прочность твёрдых тел. «Журнал Проблемы машиностроения и надёжности машин», 2005, №6 стр. 51-61.
4. Максак В.И. Предварительное смещение и жесткость механического контакта. М., изд-во «Наука», 1975, 60стр

КОНТАКТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТЕЛ ПРИ КАЧЕНИИ

Максимов Ю.А. – аспирант, Котенева Н.В. – к.т.н., доцент
Алтайский государственный технический университет (г. Барнаул)

При анализе напряженного состояния материала и описании процессов деформирования поверхностей почти не учитывали пластических деформаций поверхностного слоя материала, которые возникают в той или иной степени во всех случаях контактирования реальных поверхностей. При локальном контактировании деформации появляются при всех, даже самых малых нагрузках сжатия, что было обнаружено еще Штрибеком [1].

Так как реальные поверхности никогда не бывают идеально гладкими, то нагрузка концентрируется на гребешках микронеровностей, ультраместные напряжения легко переходят границу упругости и пластическое деформирование материала начинается со смятия вершин микровыступов. С повышением нагрузки пластическое деформирование захватывает группы гребешков, расположенных на вершинах макронеровностей поверхности, деформируя их и образуя отдельные пятна в зоне общей поверхности контакта. Эти пятна, в свою очередь, могут быть сплошными или разделены па отдельные штрихи и площадки в зависимости от общей макро- и микрогеометрии поверхностей. На отдельных участках пластическое деформирование может сочетаться с упругим деформированием материала в зависимости от формы неровностей, размеров, сочетания в их расположении и, наконец, в зависимости от упругих и пластических свойств самого материала и его поверхностного слоя.

При дальнейшем повышении нагрузки образуется более или менее сплошное пятно контакта, способное воспринимать нагрузку без ощутимых пластических деформаций, среднее давление на этом пятне возрастает и приводит в действие весь механизм упругих микроперемещений на поверхности сжатия.

Увеличение сжимающих нагрузок сверх определенного предела, зависящего от свойств материала, нарушает картину распределения упругих деформаций и напряжений, проанализированную в решениях классической контактной задачи теории упругости, так как вызывает необратимые деформации в значительных объемах, соизмеримых с общим объемом материала, охваченным местным деформированием. Установлено, что пластическое деформирование гребешков микронеровностей и даже всего поверхностного слоя является обязательным для любого одноразового нагружения реальных поверхностей.

При повторном нагружении поверхности той же нагрузкой пластическое деформирование крайнего поверхностного слоя возобновляется, но в значительно меньшей степени и быстро затухает, хотя полностью не прекращается ни при повторном статическом сжатии, ни тем более при качении или качении со скольжением.

Объясняется это тем, что при высоких переменных контактных давлениях совмещенные поверхности почти всегда испытывают относительные тангенциальные микросмещения на

большой части поверхности контакта. Эти смещения вызывают деформирование микронеровностей, частично упругое, частично пластическое, но никогда точно не повторяющееся.

Действительно, совершенно невозможно достичь идеального повторения картины контактирования всех микронеровностей двух поверхностей после циклического раскрытия их стыка, так как необратимые микроперемещения на поверхностях всегда будут неодинаковы из-за микронеоднородности структуры материалов, различия в упругом последствии и по другим причинам.

По этой же причине в процессе эксплуатации никогда не сохраняется исходная шероховатость рабочих поверхностей, подвергаемых контактному нагружению. Шероховатые поверхности обминаются и становятся более гладкими, а самые гладкие поверхности приобретают определенную шероховатость.

Касательные внешние усилия при переменных сжимающих нагрузках и движении поверхностей многократно усиливают пластическое деформирование поверхностного слоя и ускоряют процесс перехода от исходной шероховатости к эксплуатационной. Пластическое деформирование зависит от распределения контактных напряжений. При статическом контакте соприкасающиеся поверхности необратимо меняют свою форму и размеры. Так, при контакте сферы с плоскостью последняя приобретает вогнутую форму, а выпуклая поверхность сферы хотя и остается выпуклой, но ощутимо изменяет свою кривизну, причем особенно в центральной части пятна.

Степень необратимого изменения исходной формы сопряженных поверхностей зависит от твердости материала. Детали, изготовленные из твердой ($HRC\ 60—61$) закаленной стали с чистотой поверхности в пределах 9-го класса, изменение радиуса кривизны выпуклых поверхностей при предельных нагрузках колеблется в пределах 12—25% для центральной части контакта; для всей зоны — 8—15%.

Соответственно изменяется форма плоской поверхности. В результате увеличиваются фактические размеры контактной площадки (3—9%) и соответственно уменьшаются напряжения в области контакта; так, при твердости образцов $HRC\ 60$ изменения иногда достигают 20—30%.

С накоплением числа циклов нагружений пластическая деформация возрастает, кривизны поверхностей изменяются, пятно контакта увеличивается и напряжения падают до 88% от начальных фактических напряжений, вычисленных с учетом первичной пластической деформации. После нескольких тысяч циклов общее снижение напряжений по сравнению с расчетным может достигать 30% и более.

В процессе качения необратимые изменения формы поверхностей распространяются вдоль пути качения и желоба колец шарикоподшипников и сферических роликоподшипников приобретают большую кривизну, чем полученная при обработке, увеличивается ширина фактической беговой дорожки. Следует отметить, что изменение формы рабочих поверхностей деталей подшипников различно для тел качения и дорожек колец.

Увеличение глубины смятия поверхностей тел качения (шариков, роликов) обычно в 2 раза меньше, чем колец. Объясняется это более высокой чистотой и особенностями технологической обработки шариков и роликов, а также свойствами выпуклых поверхностей, которые в меньшей степени подвержены деформированию, чем плоские и вогнутые.

Повышение общей твердости материала влияет на величину смятия поверхностей, но мало изменяет число циклов нагружений, необходимое для окончания пластического деформирования.

На абсолютную величину смятия значительно влияет степень шероховатости обкатываемых поверхностей, изменение которой на один класс (в пределах 7—10-го классов) удваивает глубину установившегося смятия. При переходе к более высоким классам чистоты влияние шероховатости ослабевает и величина смятия больше зависит от пластических свойств поверхностного слоя, определяемых методом окончательной технологической обработки (полирование, доводка, суперфиниширование, гидрополирование и т. д.).

Взаимосвязь между поверхностными пластическими деформациями и повторными контактными нагрузками характеризует предел приспособляемости материала, т. е. его способности после некоторого числа повторных нагружений, вначале вызывающих текучесть, переносить дальнейшие нагрузки той же величины без увеличения пластической деформации (теорема Мелана) [2].

Если же рост пластической деформации продолжается, значит «предел приспособляемости» или «предел смятия» еще не достигнут либо отсутствует.

Применительно к плоской контактной задаче этот вопрос рассмотрен К. Джонсоном [3] для случая качения бесконечного жесткого цилиндра по плоскости, ограничивающей упруго-пластичное полупространство. Сопоставляя критерии текучести, соответствующие различным теориям прочности, и ограничивая остаточные напряжения только нормальными составляющими, параллельными поверхности, автор показывает, что при повторных перекачивании совокупность остаточных и контактных (упругих) напряжений приводит к некоторому упругому состоянию, если $p_0 \leq 4\sigma_T$, где p_0 — максимальное давление по Герцу; σ_m — предел текучести при чистом сдвиге.

Таким образом, начинают появляться теоретические обоснования для расчета накопленных контактных пластических деформаций.

Ввиду неизбежности появления некоторых пластических деформаций крайнего поверхностного слоя деталей, работающих при качении, для точных узлов машин и приборов необходима предварительная обкатка деталей подшипников качения. Такая операция обеспечивает стабильность размеров, формы рабочих поверхностей и величины зазоров, повышая точность и долговечность узла в целом.

В некоторых случаях операции пластического изменения формы обкатываемых поверхностей применяют не только с целью предупреждения быстрого развития зазоров в начальный период работы узла, но и как основной технологический прием для образования желоба рабочей поверхности на последней стадии технологического процесса, т. е. после закалки деталей и шлифования поверхностей.

Так, например, при производстве прецизионных шарикоподшипников для шлифовальных шпинделей, у которых одно кольцо имеет неглубокий желоб, а другое — коническую рабочую поверхность с прямолинейной образующей, предусмотрена операция накатки желоба непосредственно перед окончательной сборкой подшипников.

Для этого на специальном станке устанавливается внутреннее желобчатое кольцо с комплектом шаров, превышающих по размерам нормальные шары этого подшипника на величину, учитывающую необходимость образования желобка заданных размеров (глубиной несколько сотых мм) и особенности упруго-пластического деформирования поверхности детали, закаленной на высокую твердость и обработанной по 11 классу чистоты. Процесс накатки желобка, проводимый при обильной смазке и возрастающем рабочем давлении на подшипник, занимает мало времени. Образованная таким образом рабочая поверхность обладает повышенным сопротивлением контактной усталости, если применяемые нагрузки не превышают определенного значения, связанного с пределом приспособляемости материала для заданных условий [4].

Таким образом, предварительная приработка узлов с пластическим деформированием поверхностного слоя значительно увеличивает срок эксплуатации и предупреждает быстрое развитие зазоров в начальный момент работы. Дальнейшее исследование взаимосвязей между поверхностными упруго-пластическими деформациями и повторными контактными нагрузками позволит оценить влияние динамических нагрузок на свойства контакта. Развитие теории контактного взаимодействия при качении позволит создать более точные и работоспособные соединения с заданными прочностными и динамическими характеристиками. Наличие универсального подхода позволит оценивать влияние параметров контактирования на поведение узлов при воздействии динамических нагрузок.

Список литературы

1. Пинегин С.В. Контактная прочность и сопротивление качению. М., «Машиностроение», 1969
2. Королев Н.А. Новый метод измерения вертикальных перемещений в зоне контакта сопряженных тел. Известия ВУЗов «Машиностроение», 1962, №6
3. Jonson K.L. Surface interaction between elastically loaded bodies under tangential forces. Proc. Of R. Soc. Ser. A, Math. a Phys. Sciences N1183, 1955
4. Ковалев М.П. , Моржаков С.П. Терехова К.С. Динамическое и статическое уравнивание гироскопических систем. М., «Машиностроение», 1965.