

**В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, А. В. Лабарткава, Фам Ван Туан\***

## **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ВТУЛОК ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Методом компьютерного моделирования исследованы особенности напряженно-деформированного состояния двухслойных втулок из разнородных материалов применительно к диффузионной сварке и пайке с давлением. Установлено, что при остывании таких узлов возникают большие напряжения, которые приводят к пластическим деформациям в пластичном материале и могут вызвать разрушение непластичных материалов.

### *Постановка проблемы*

Развитие современных машиностроения, приборостроения и других отраслей промышленности, где используются узлы и детали, работающие в экстремальных условиях, требует применения новых конструкционных материалов и соединений разнородных материалов. В основном это трудносвариваемые материалы с существенно отличающимися физико-механическими свойствами. Соединение этих материалов возможно с применением пайки и сварки с давлением [1]. Проблема изготовления деталей заключается не только в получении качественного соединения, но и в сохранении целостности сварного узла после остывания при возникновении значительных собственных напряжений.

В настоящее время в литературе отсутствуют сведения и рекомендации по конструированию таких узлов вследствие малой изученности их напряженно-деформированного состояния при нагреве и охлаждении. Имеющиеся решения [2—4] могут использоваться только для приближенной оценки, поскольку не дают полной картины напряженного состояния, особенно вблизи торцевых поверхностей, и не учитывают пластических деформаций, возникающих при изменении температуры в большом диапазоне. Более точные решения получены только для стыковых соединений цилиндрических деталей в процессе диффузионной сварки [5]. Поэтому настоящая работа является актуальной.

Цель работы — установление особенностей напряженно-деформированного состояния двухслойных втулок из разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой и пайкой с давлением.

### *Результаты исследования и их обсуждение*

Исследования выполняли методом компьютерного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. На данном этапе

---

\* В. В. Квасницкий — кандидат технических наук, доцент, НТУУ “КПИ”, Киев; Г. В. Ермолаев — кандидат технических наук, доцент, Национальный университет кораблестроения, г. Николаев; А. В. Лабарткава — кандидат технических наук, доцент, там же; Фам Ван Туан — инженер, там же.

работы учитывались только деформации мгновенной пластичности. В качестве условия появления пластических деформаций принято условие Мизеса  $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_T$ , где  $\sigma_{\text{экв}}$  — эквивалентные (приведенные) напряжения;  $\sigma_T$  — предел текучести.

Для осесимметричной задачи (цилиндрические конструкции), когда касательные напряжения  $\tau_{yz}$  и  $\tau_{xz}$  отсутствуют, эквивалентные напряжения равны  $\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_z\sigma_x + 3\tau_{xy}^2}$ , где  $\sigma_x$  — радиальные,  $\sigma_y$  — осевые,  $\sigma_z$  — окружные (тангенциальные),  $\tau_{xy}$  — касательные напряжения.

Вследствие симметрии втулки относительно середины ее высоты при моделировании рассматривали ее нижнюю половину с соответствующим закреплением узлов по горизонтальной оси. Исследованные типы узлов и сечения их моделей показаны на рис. 1.

В модели 1 с прямолинейной образующей внешней цилиндрической поверхности (рис. 1, а, в) рассматривали 3 варианта сочетания толщин слоев  $b_1 + b_2 = 5 + 15$ ,  $10 + 10$  и  $15 + 5$  мм. Для модели 2 (рис. 1, б, г) рассматривали только вариант одинаковых внутренней цилиндрической

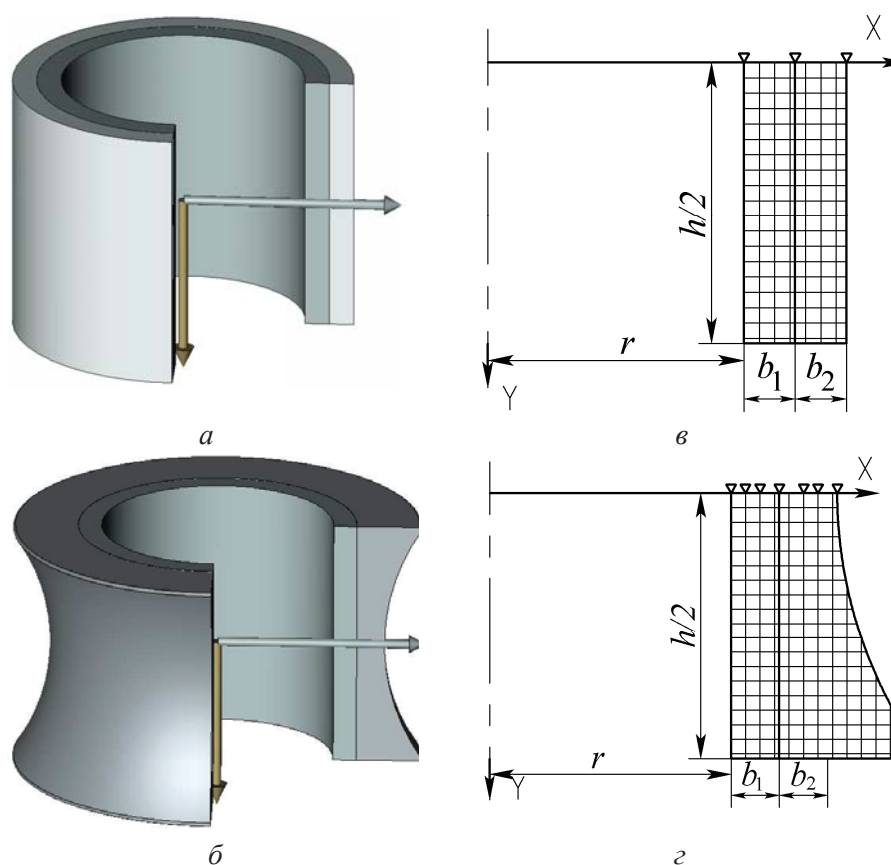


Рис. 1. Общий вид узлов (а, б) и сечения их моделей (в, г)

Fig. 1. A general view of units (a, б) and sections of their models (в, г)

толщины и минимальной толщины фигурной наружной втулок ( $b_1 = b_2 = 10$  мм). Высота  $h$  и внутренний радиус  $r$  при этом во всех вариантах оставались неизменными, равными 110 и 50 мм соответственно.

Свойства для материала 1 внутреннего слоя (низкоуглеродистая сталь) приняты равными: модуль упругости  $E_1 = 2 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент линейного термического расширения (КЛТР)  $\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6}$  1/град, предел текучести  $\sigma_T = 200$  МПа. Для материала 2 внешнего слоя — как для твердого сплава:  $E_2 = 4 \cdot 10^5$  МПа,  $\alpha_2 = 4 \cdot 10^{-6}$  1/град, материал предполагался только упругодеформируемым.

В качестве нагружения рассматривали охлаждение с 600 °С. При более высокой температуре сталь практически полностью теряет свои упругие свойства [2] (рис. 2), деформируется пластически. Кроме того, образовавшиеся напряжения быстро релаксируют, поэтому при достаточно медленном охлаждении напряжения остаются близкими к нулю. В диапазоне температур до 600 °С все свойства принимались постоянными, близкими к таковым при нормальной температуре. Такое допущение вносит небольшую погрешность в расчет [6].

Модуль упрочнения при пластическом деформировании принят равным нулю, что с учетом интенсивного протекания процессов релаксации и ползучести в стали при высокой температуре близко к действительности.

Анализ полей напряжений и деформаций во втулке с одинаковой толщиной слоев (рис. 3) показал, что при охлаждении узла образуется довольно сложное объемное напряженное состояние с достаточно большими напряжениями на отдельных участках. Вместе с тем на большей части сечения втулки радиальные напряжения  $\sigma_x$  (рис. 3, а) в обоих слоях малы и не превышают 45 МПа. При непосредственной близости от торцевой поверхности (на расстоянии, меньшем толщины слоя) они заметно увеличиваются, особенно во внешнем слое из более жесткого материала,

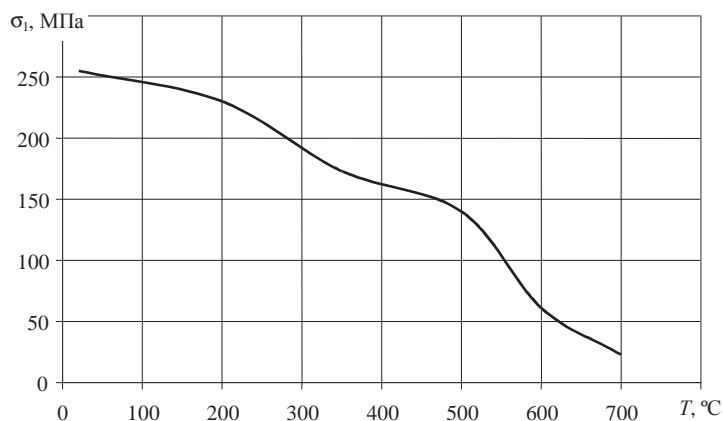


Рис. 2. Зависимость предела текучести стали 15 от температуры

Fig. 2. Dependence of a limit of fluidity of steel 15 from temperature

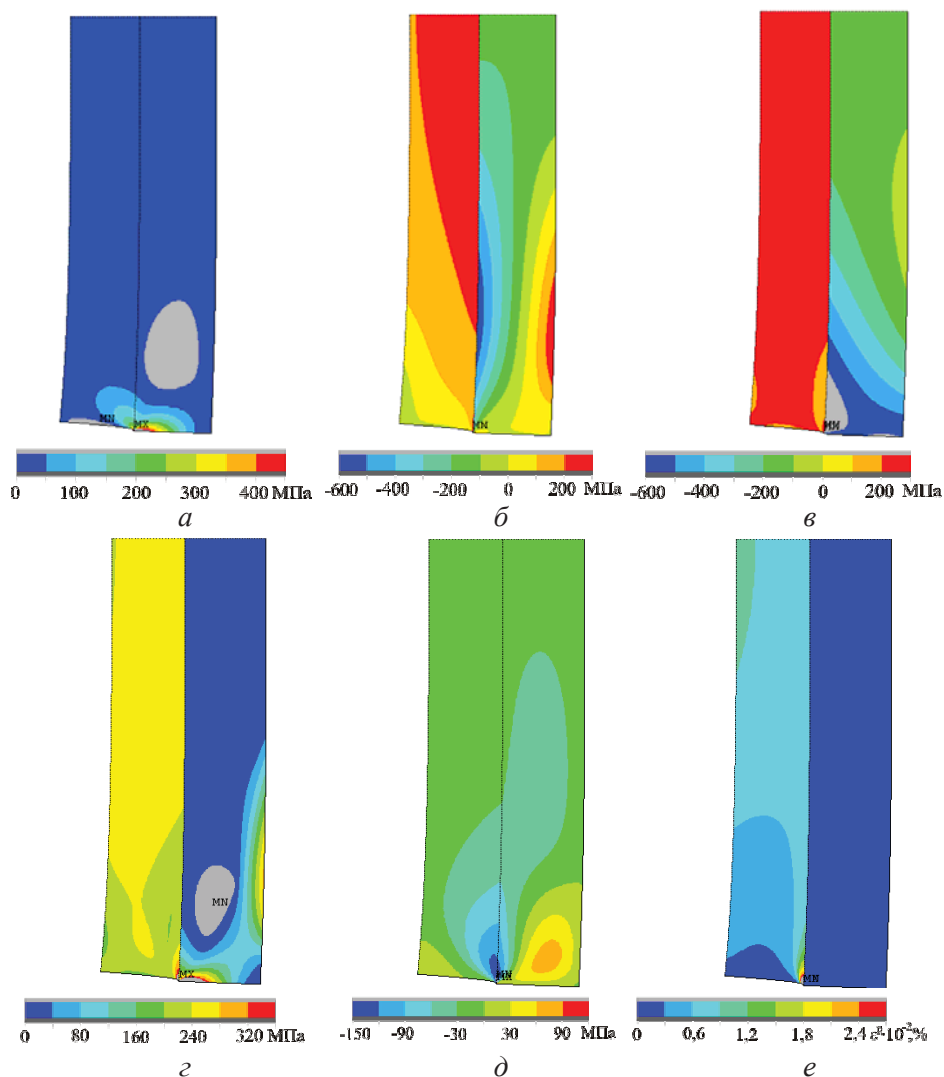


Рис. 3. Поля радиальных  $\sigma_x$  (а), осевых  $\sigma_y$  (б), окружных  $\sigma_z$  (в), максимальных главных  $\sigma_1$  (г), касательных  $\tau_{xy}$  (д) напряжений и пластических деформаций (е)

Fig. 3. Fields radial  $\sigma_x$  (a), axial  $\sigma_y$  (b), district maximal  $\sigma_z$  (c), main  $\sigma_1$  (d), tangents  $\tau_{xy}$  (e) pressure voltage and plastic deformations (e)

и наибольших значений (1030 МПа) достигают на торцевой поверхности внешнего слоя у стыка слоев. Эти напряжения при охлаждении — растягивающие, поэтому опасны для материала наружного слоя.

Осевые напряжения  $\sigma_y$  (рис. 3, б) распределены по всему сечению, во внутреннем слое преобладают растягивающие напряжения (до 300 МПа), во внешнем — сжимающие (до 600 МПа), при этом они в обоих слоях уменьшаются по мере удаления от стыка и приближения к торцам.

Окружные напряжения  $\sigma_z$  (рис. 3, в) также растягивающие (200—300 МПа) во внутреннем слое и сжимающие (200—890 МПа) во внешнем.

Очевидно, что эти напряжения не опасны для материала наружного слоя, обладающего большой прочностью при сжатии.

Касательные напряжения  $\tau_{xy}$  (рис. 3, *з*) на большей части сечения малы (в пределах 30—60 МПа). Наибольшей величины (до 260 МПа) они достигают в материале наружного слоя по стыку вблизи торцевой поверхности.

Наибольший интерес с точки зрения оценки вероятности разрушения хрупкого материала наружного слоя представляют главные максимальные напряжения  $\sigma_1$  (рис. 3, *д*). На большей части сечения внутреннего слоя они не превышают 250 МПа и возрастают до 300 МПа на небольшом участке стыка вблизи торцевой поверхности. Во внешнем слое они отличны от нуля только на участке сечения, прилегающем к торцевой и внешней поверхностям. Максимального значения (1050 МПа) эти напряжения достигают на торцевой поверхности вблизи стыка (поверхности раздела материалов), что подтверждает опасность образования трещин в этой зоне.

Эквивалентные напряжения, характеризующие поведение пластичного материала внутреннего слоя, распределены в нем достаточно равномерно, оставаясь на большей его части на уровне 200—210 МПа, то есть во внутреннем слое втулки эквивалентные напряжения достаточны для пластического деформирования материала. Поле эквивалентных пластических деформаций (рис. 3, *е*) подтверждает их наличие практически по всему сечению на уровне 0,33—1,0% с резким увеличением до 10% в стыке вблизи торцевой поверхности. Величина осевых составляющих пластических деформаций не превышает 10%, что для достаточно пластичного материала не опасно.

Таким образом, анализ полей напряжений показал, что наиболее опасной с точки зрения образования трещин является зона на торцевой поверхности вблизи стыка (поверхности раздела слоев). На эпюрах напряжений  $\sigma_1$  вдоль торцевой поверхности (рис. 4) хорошо видно резкое возрастание максимальных главных напряжений в этой зоне. Во внешнем слое, материал которого не способен деформироваться пластически, как уже отмечалось, уровень максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_1$  достигает 1030 МПа, то есть вероятность образования трещины для материалов с пределом прочности до 1050 МПа достаточно велика. Для более прочных материалов получение узла без трещин принципиально возможно.

Сравнение полей напряжений и эпюр для втулок с разным соотношением толщин слоев (рис. 4) показало, что при уменьшении толщины внутреннего слоя (из менее прочного и достаточно пластичного материала) до 5 мм и соответствующем увеличении толщины наружного (из твердого сплава) уровень растягивающих напряжений в твердом сплаве снижается до 900 МПа. При обратном изменении соотношения толщин максимальные растягивающие напряжения также снижаются до 860 МПа.

Таким образом, наиболее неблагоприятным является равенство толщин и при выборе соотношения толщин соединяемых слоев следует по возможности уменьшать толщину одного из слоев и увеличивать толщину другого.

Сравнение полей напряжений во втулках с прямолинейной (модель 1) и криволинейной (модель 2) формой образующей внешней поверхности (см. рис. 1) показало, что при одинаковых свойствах материалов слоев и

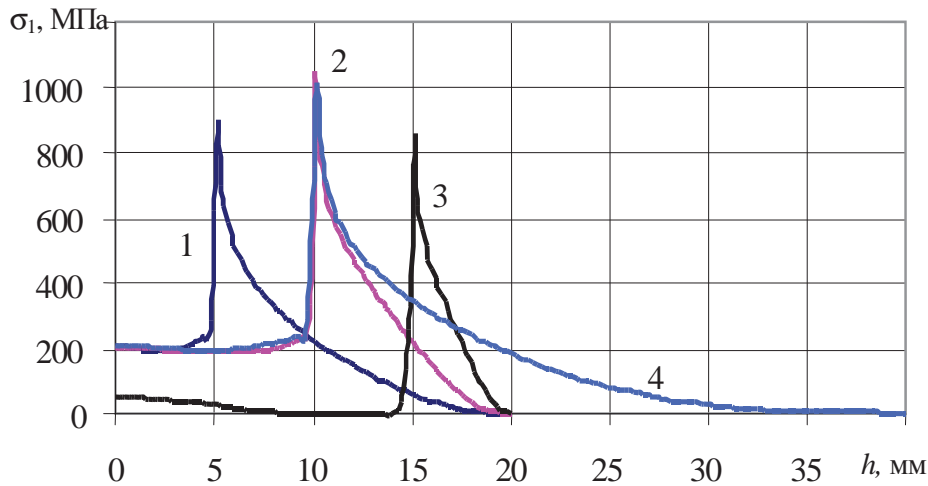


Рис. 4. Эпюры максимальных главных напряжений  $\sigma_1$  вдоль торцевой поверхности в двухслойных втулках при соотношении толщин слоев модели 1 — 5 + 15 (1), 10 + 10 (2) и 15 + 5 (3) и в модели 2 (4)

Fig. 4. Эпюры the maximal main pressure voltage  $\sigma_1$  along a face surface in two-layer cartridges at a parity ratio of thickness of layers of model 1 — 5 + 15 (1), 10 + 10 (2) and 15 + 5 (3) and in model 2 (4)

одинаковых толщинах в средней части (посредине высоты) втулки уровень напряжений в опасной зоне отличается незначительно, в пределах 5—10% (рис. 4, кривые 2 и 4), то есть основным определяющим с точки зрения напряженно-деформированного состояния фактором, помимо термомеханических свойств, является соотношение толщин слоев.

В работе учитывались только деформации мгновенной пластичности. Очевидно, что при достаточно медленном охлаждении за счет процессов релаксации и ползучести величина пластических деформаций во внутреннем слое увеличится, а уровень напряжений будет снижаться в обоих слоях, благодаря чему опасность хрупкого разрушения уменьшится.

### **Выводы**

После охлаждения двухслойной втулки из стали и твердого сплава вероятность образования трещины в сплаве с пределом прочности до 1050 МПа достаточно велика. Для более прочных материалов получение узла без трещин диффузионной сваркой и пайкой принципиально возможно.

При выборе соотношения толщин соединяемых слоев следует по возможности избегать одинаковых толщин, уменьшать толщину одного слоя за счет увеличения другого.

Форма внешней поверхности втулки мало влияет на характер распределения и величину напряжений.

**РЕЗЮМЕ.** Методом комп'ютерного моделювання досліджено особливості напружено-деформованого стану двошарових втулок з різнорідних матеріалів стосовно дифузійного зварювання та паяння с тиском.

Встановлено, що під час охолодження таких вузлів утворюються великі напруження, що призводять до пластичного деформування пластичних матеріалів і можуть спричинити руйнування непластичних матеріалів.

1. *Лебедев В. К., Кучук-Яценко С. И., Четверо Я. И. и др.* Машиностроение. Технология сварки, пайки и резки: Энциклопедия. Т. III, IV. / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 2006. — 768 с.
2. *Бажанов В. Л., Гольденблат И. И., Николаенко Н. А. и др.* Расчет конструкций на тепловые воздействия. — М.: Машиностроение, 1969. — 600 с.
3. *Прочность, устойчивость, колебания: (Справ.).* В 3-х т. / Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. — М.: Машиностроение, 1968. — Т. 1. — 832 с.
4. *Канторович З. Б.* Основы расчета химических машин и аппаратов. — М.: Машгиз, 1960. — 744 с.
5. *Махненко В. И., Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В.* Влияние физико-механических свойств соединяемых материалов и геометрии деталей на распределение напряжений при диффузионной сварке в вакууме // Автоматическая сварка. — 2008. — № 1. — С. 5—11.
6. *Винокуров В. А.* Сварочные деформации и напряжения. — М.: Машиностроение, 1968. — 236 с.

Поступила 10.09.07

**Kvasnytsky V. V., Ermolaev G. V., Labartkava A. V., Fam Van Tuan**

#### **The condition of two-layer cartridges from diverse materials is intense deformed**

By the method of computer modeling are researched the features of the stress — deformed mode of the two layers bushings from the dissimilar materials in connection with diffusion welding and soldering with the pressure. It has determined that during cooling-down of such it is main they appear the large stresses, which lead to the plastic deformations in the plastic material and they can lead to the destruction of the nonplastic materials.