

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ УЗЛОВ ИЗ ОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ ОСЕВОЙ НАГРУЗКЕ

В. В. КВАСНИЦКИЙ^{1,3}, В. Ф. КВАСНИЦКИЙ², DONG CHUNLIN³, М. В. МАТВИЕНКО², Г. В. ЕРМОЛАЕВ²

¹НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского».

03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова.

54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

³China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding, Guangzhou, P. R. China. E-mail: dchunlin@163.com

Методом компьютерного моделирования исследовано напряженное состояние в узлах, полученных диффузионной сваркой и пайкой, под действием осевой нагрузки. Рассмотрены цилиндрические узлы из стали с прослойкой меди с нагружением выше предела текучести меди. Показано, что в результате формирования сложного напряженного состояния уровень эквивалентных напряжений в прослойке снижается по сравнению с приложенной осевой нагрузкой и повышается в небольшой зоне основного металла вблизи внешней поверхности у стыка с прослойкой, что вызывает эффект упрочнения (разгрузки) прослойки и разупрочнения (перегрузки) основного металла. Получены количественные зависимости степени упрочнения прослойки и разупрочнения основного металла от величины внешней нагрузки. Установлено, что в упругопластической стадии нагружения узла разупрочнение основного металла более выражено, чем в упругой. Степень упрочнения прослойки в упругой стадии ее работы не зависит от величины внешней нагрузки, а в упругопластической стадии растет пропорционально нагрузке. Библиогр. 9, рис. 5.

Ключевые слова: сварные и паяные узлы, мягкая прослойка, компьютерное моделирование, напряженное состояние, силовое нагружение

В современной технике все более широко применяются новые композиционные материалы и узлы, которые нельзя соединить сваркой плавлением. В этих случаях используют пайку или сварку в твердом состоянии, например диффузионную сварку в вакууме (ДСВ). При ДСВ часто используют промежуточные прослойки для образования гарантированного контакта соединяемых поверхностей по всей площади. В качестве прослоек используют медь, алюминий, никель. При пайке промежуточной прослойкой является паяный шов.

Напряженное состояние и работа соединений с мягкой прослойкой исследовались в работах [1–3], но аналитические методы имеют ограниченные возможности, не позволяют учесть все особенности материалов, видов нагружения и конструктивных факторов, в том числе и кинетику формирования напряженного состояния (НС).

Современная компьютерная техника и разрабатываемые программные комплексы дают широкие возможности для таких исследований. В данной работе для моделирования НС использовали программный комплекс ANSYS, основанный на методе конечных элементов, который применялся нами и в предыдущих работах [4–7].

В работе [6] установлено, что в узлах с мягкой прослойкой при нагружении осевой нагрузкой НС в зоне соединения становится объемным, эк-

вивалентные напряжения в материале прослойки уменьшаются, а в более прочном основном материале наоборот — увеличиваются, т. е. проявляется так называемый эффект упрочнения мягкой прослойки [1–3], связанный с НС соединения. При этом моделировался только один вариант, когда приложенная нагрузка (40 МПа) близка к пределу текучести (38 МПа) материала прослойки.

Целью настоящей работы было исследование НС сварных и паяных узлов из однородных материалов с мягкой прослойкой при одноосном нагружении сжатием, при котором осевые напряжения от приложенной нагрузки заметно превышают предел текучести материала прослойки как в процессе формирования соединения, так и при работе на растяжение.

Мягкой называют прослойку, предел текучести которой меньше, чем у основного металла ($\sigma_{T_{\text{пр}}} < \sigma_{T_{\text{ом}}}$).

Исследовались НДС цилиндрических узлов при соединении однородного материала (сталь + сталь) через мягкую прослойку меди толщиной 50 мкм (относительная толщина $s/d = 0,0025$).

Вследствие симметрии образца относительно середины толщины прослойки моделировалось НС верхней половины образца с соответствующим закреплением узлов на нижней кромке модели.

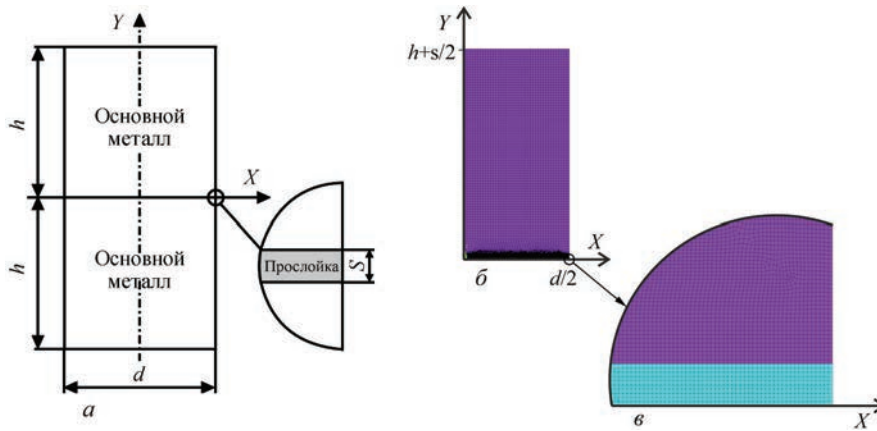


Рис. 1. Общий вид образца с прослойкой (а), сечение осесимметричной конечно-элементной модели (б) и зона сопряжения прослойки с соединяемым металлом (в)

Размеры модели: цилиндр диаметром $d = 20$ мм и высотой $h = 20$ мм, половина толщины прослойки $s/2 = 25$ мкм. Схема разбивки на конечные элементы (КЭ) модели в целом и области, прилегающей к прослойке, приведена на рис. 1.

Свойства соединяемых материалов и прослойки: сталь с модулем упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, пределом текучести 250 МПа, коэффициентом Пуассона 0,3, модуль упрочнения при пластическом деформировании $2 \cdot 10^3$ МПа; медь с модулем упругости $E = 1 \cdot 10^5$ МПа, пределом текучести 100 МПа, коэффициентом Пуассона 0,34, модуль упрочнения при пластическом деформировании $1 \cdot 10^3$ МПа.

Модель нагружалась осевой нагрузкой сжатия, от которой значение напряжения изменялось от 100 до 200 МПа, т. е. максимальные напряжения превышали предел текучести прослойки до двух раз, так, чтобы процесс деформирования материала прослойки происходил как в упругой, так и пластической стадиях. При смене сжатия (в процессе формирования соединения) на растяжение (в процессе эксплуатации) знаки напряжений и деформаций поменяются на обратные без изменения их значений и характера распределения.

Для оценки влияния НДС на механические свойства материалов в зоне соединения использовался коэффициент жесткости напряженного состояния, равный отношению приложенных к узлу напряжений σ_y к эквивалентным $\sigma_{эkv}$ в данном материале: $K_{ж} = \sigma_y / \sigma_{эkv}$ [8]. Величина этого коэффициента определяет эффект разупрочнения (эквивалентные напряжения превышают приложенную нагрузку, $K_{ж} < 1$) или упрочнения (эквивалентные напряжения меньше приложенных, $K_{ж} > 1$) материала в той или иной зоне узла по сравнению с линейным напряженным состоянием, в условиях которого проводятся стандартные механические испытания материалов на прочность. При $K_{ж} < 1$ снижается прочность, т. е. способность сопротивляться пластическому деформированию

материала и повышается его пластичность, т. е. способность пластически деформироваться без разрушения. При $K_{ж} > 1$ напротив, прочность повышается, а пластичность снижается.

Анализ полей всех составляющих и эквивалентных напряжений в узлах при нагружении осевой нагрузкой показал, что в результате отличающихся механических свойств соединяемых материалов и прослойки в небольшой зоне соединения, а именно, в материале прослойки и прилегающих участках основного металла, шириной около двух толщин прослойки, помимо осевых напряжений появляются все другие составляющие: радиальные, окружные нормальные и касательные напряжения, т. е. НДС становится объемным. В результате чего в этой зоне узла эквивалентные напряжения отличаются от приложенных осевых σ_y , превышая их в основном металле, и снижаясь в материале прослойки. При этом при увеличении нагрузки характер полей практически не изменяется, растет только уровень напряжений пропорционально увеличению нагрузки.

Анализ эпюр эквивалентных напряжений (рис. 2), определяющих поведение материала при нагружении (чисто упругое или упругопластическое деформирование), показал, что как в соединяемых материалах, так и в прослойке, на большей части ее длины (до 80...90 %) сохраняется практически постоянный их уровень.

При этом в основном металле эквивалентные напряжения равны приложенной нагрузке (рис. 2, а, в), а в прослойке они изменяются от 71 до 100 МПа (упругое нагружение) при изменении нагрузки от 100 до 130 МПа и остаются практически неизменными на уровне предела текучести (около 100 МПа) при нагрузке от 140 до 200 МПа (упругопластическое нагружение) (рис. 2, б, г).

В непосредственной близости от кромки стыка они несколько возрастают как в основном металле, так и в материале прослойки в упругой стадии ее работы. Ширина зоны повышенных напряжений не

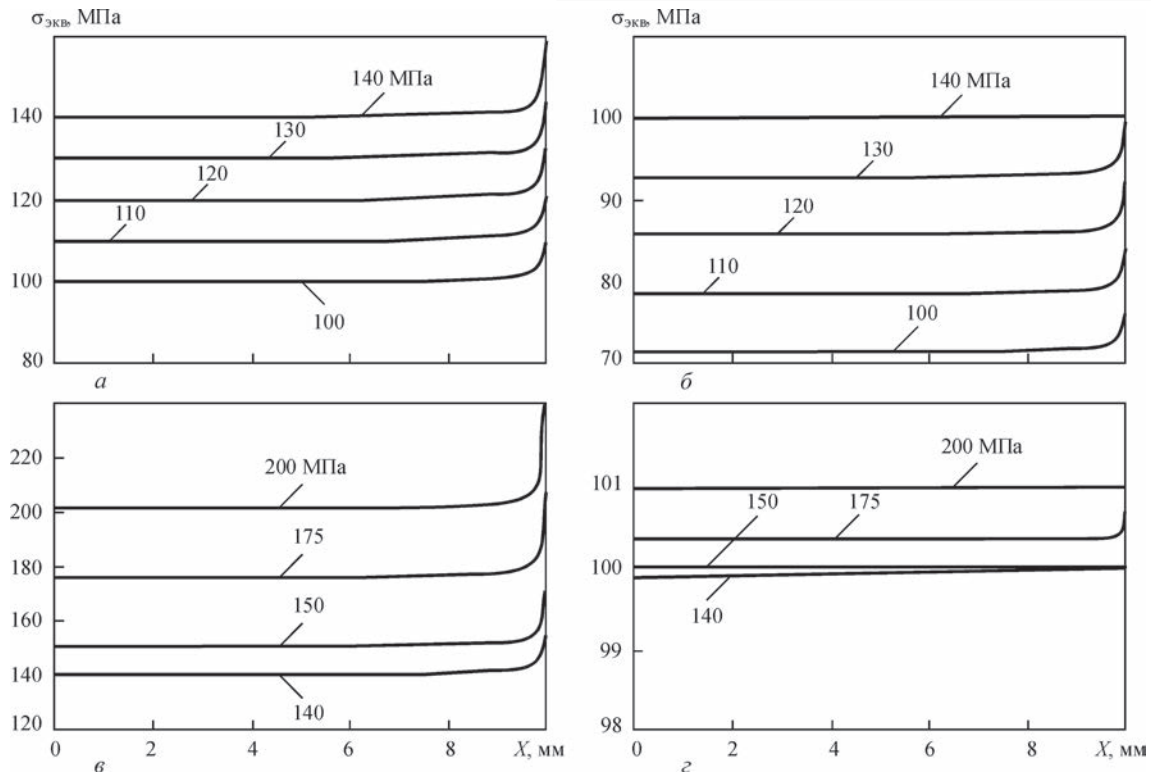


Рис. 2. Эпюры эквивалентных напряжений по стыку в стали (а, в) и прослойке (б, з) при разных осевых нагрузках

превышает 1...2 мм (10...20 % радиуса образца). Это приводит к изменению коэффициента жесткости $K_{ж}$ напряженного состояния на этом участке и несколько изменяет эффект разупрочнения или упрочнения по сравнению с линейным напряженным состоянием.

Для анализа и сравнения с более прочными прослойками, имеющими больший предел текучести, использовали понятие «коэффициент перегрузки прослойки», равный отношению напряжений от приложенной осевой нагрузки к пределу текучести прослойки $K_{пер} = \sigma_{нагр} / \sigma_{тпр}$. В нашем случае при упругом нагружении прослойки он изменялся в пределах от 1,0 (нагружение 100 МПа) до 1,3 (130 МПа), а при упругопластическом от 1,4 (140 МПа) до 2,0 (200 МПа).

С увеличением нагрузки от 100 до 130 МПа (степень перегрузки прослойки от 1,0 до 1,3) максимальные эквивалентные напряжения в основном металле вблизи кромки стыка увеличиваются от 108 до 141 МПа (рис. 2, а) по линейному закону. Соответственно, коэффициент разупрочнения (жесткости напряженного состояния) основного металла вблизи кромки стыка при этом остается практически неизменным на уровне около 0,92.

При дальнейшем увеличении нагрузки от 140 до 200 МПа, когда в прослойке появляются пластические деформации, максимальные напряжения, как и при упругом нагружении, увеличиваются от 155 до 241 МПа (рис. 2, в) также практически по линейному закону, который описывается уравнением $\sigma_{экв} = 141K_{пер} - 41$, несколько отличающимся от

упругой стадии $\sigma_{экв} = 110K_{пер} - 2$. Соответственно, происходит уменьшение коэффициента жесткости напряженного состояния в основном металле у кромки стыка от 0,90 при нагрузке 140 МПа, вызывающей появление пластических деформаций в прослойке, до 0,83 при давлении 200 МПа.

Снижение жесткости напряженного состояния вызывает эффект разупрочнения основного металла у поверхности узла, выражающийся в том, что максимальные эквивалентные напряжения на кромке стыка превышают напряжение от приложенной осевой нагрузки.

Таким образом, если в упругой стадии деформирования мягкой прослойки коэффициент жесткости напряженного состояния, а, соответственно, и степень разупрочнения основного металла зависят только от соотношения модулей упругости и коэффициентов Пуассона основного металла и прослойки, и не зависят от величины приложенной осевой нагрузки, в пластической стадии проявляется также зависимость от степени перегрузки прослойки.

Для удобства сравнения двух стадий нагружения на рис. 3 приведена зависимость коэффициента разупрочнения во всем диапазоне нагружения, включая упругую и пластическую стадии работы прослойки, с изменением степени перегрузки прослойки от 1,0 до 2,0.

Из рис. 3 хорошо видно, что во второй (упругопластической) стадии нагружения узла разупрочнение основного металла более выражено, что можно объяснить заметным увеличением ко-

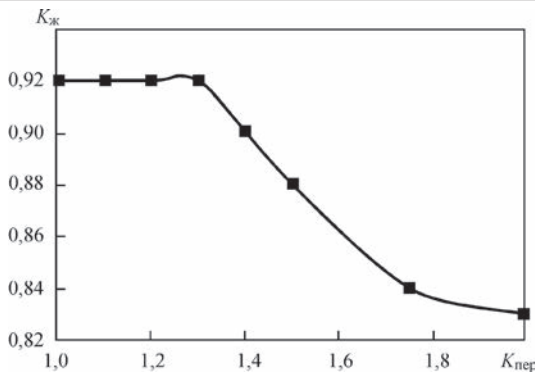


Рис. 3. Зависимость коэффициента разупрочнения и соответственно жесткости напряженного состояния $K_{ж}$ основного металла вблизи кромки стыка от степени перегрузки мягкой прослойки $K_{пер}$

коэффициента Пуассона (до 0,5) и малым коэффициентом упрочнения материала прослойки при пластическом его деформировании. Кроме того, если в упругой стадии степень разупрочнения основного металла определяется только соотношением свойств его и прослойки, то в пластической стадии она зависит также и от величины нагрузки (степени перегрузки прослойки).

В материале прослойки эквивалентные напряжения (рис. 2, б) остаются постоянными на уровне ниже предела текучести (100 МПа), несколько увеличиваясь на кромке только при нагрузке до 130 МПа. При увеличении нагрузки от 100 до 130 МПа эквивалентные напряжения в прослойке линейно увеличиваются на большей части ее длины от 71 до 93 МПа и на кромке от 75 до 98 МПа (рис. 2, б). При нагрузке от 140 до 200 МПа эквивалентные напряжения в прослойке на всей длине стыка, включая кромку, остаются на постоянном уровне, близком к пределу текучести прослойки (100 МПа). Это подтверждает, что материал прослойки с пределом текучести 100 МПа за счет повышения жесткости напряженного состояния в упругой стадии упрочняется и начинает пластически деформироваться только при нагрузке выше 130 МПа.

Соответственно изменяется и коэффициент упрочнения (жесткости напряженного состояния) прослойки. При нагрузке от 100 до 130 МПа он остается практически постоянным на уровне 1,4 на большей части стыка и 1,33 вблизи его кромки. При нагрузке выше 140 МПа он, в отличие от упругого нагружения, линейно растет и достигает величины 1,97 при 200 МПа. Его зависимость от степени перегрузки прослойки в этом диапазоне нагрузок линейна и описывается уравнением регрессии $K_{ж} = 0,98K_{пер} + 0,03$, т. е. коэффициент жесткости напряженного состояния (коэффициент упрочнения) прослойки практически равен степени ее перегрузки ($K_{ж} = K_{пер}$) (рис. 4).

Анализ эпюр касательных напряжений вдоль стыка показал, что на большей части стыка (око-

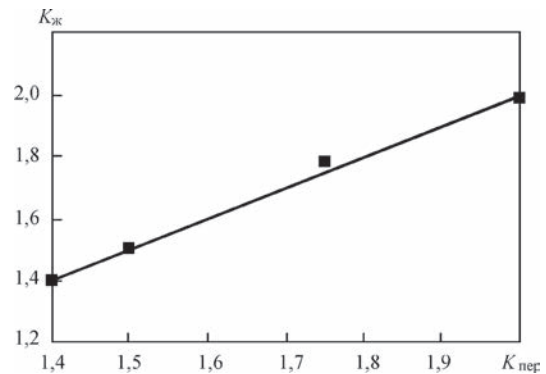


Рис. 4. Зависимость коэффициента упрочнения (жесткости напряженного состояния $K_{ж}$) прослойки от степени перегрузки «мягкой» прослойки $K_{пер}$

ло 95 %) они равны нулю, появляясь и возрастая только вблизи его кромки, на расстоянии около двух толщин прослойки (около 0,1 мм) от внешней поверхности, до 12...17 МПа. Это свидетельствует о малой эффективности чисто силового нагружения с точки зрения активации процесса пластического деформирования и образования соединения при традиционной технологии диффузионной сварки.

Характер распределения осевых напряжений вдоль образующей (внешней поверхности) узла практически одинаков при всех вариантах нагружения. Вдоль образующей (внешней поверхности) узла вблизи прослойки, в зоне шириной до двух ее толщин, они распределены неравномерно, изменяясь в пределах 70...120 МПа в прослойке и 100...170 МПа в основном металле при упругом нагружении прослойки (рис. 5, а) и 85...120 и 140...255 МПа, соответственно, при упругопластическом (рис. 5, б). При этом пик (максимум) осевых напряжений, заметно превышающий уровень напряжений от приложенной внешней нагрузки, располагается в основном металле в непосредственной близости от стыка с прослойкой.

Это свидетельствует о том, что в случае достаточного упрочнения мягкой прослойки разрушение может произойти по более прочному основному металлу на стыке с прослойкой, где разупрочнение (снижение предела текучести) соединяемого материала сочетается с повышением осевых напряжений. В соответствии с экспериментальными данными, полученными на образцах из армко-железа, паяных медью, приведенным в работе [9], при толщине прослойки меди около 0,05 мм, разрушение при испытании на растяжение происходило по железу при напряжениях в узле 325...350 МПа, что более, чем в 1,5 раза превышает предел прочности меди.

Установленные общие закономерности формирования НС в узлах с мягкой прослойкой, выражающиеся в повышении жесткости напряженного состояния, упрочнении мягкой прослойки, сни-

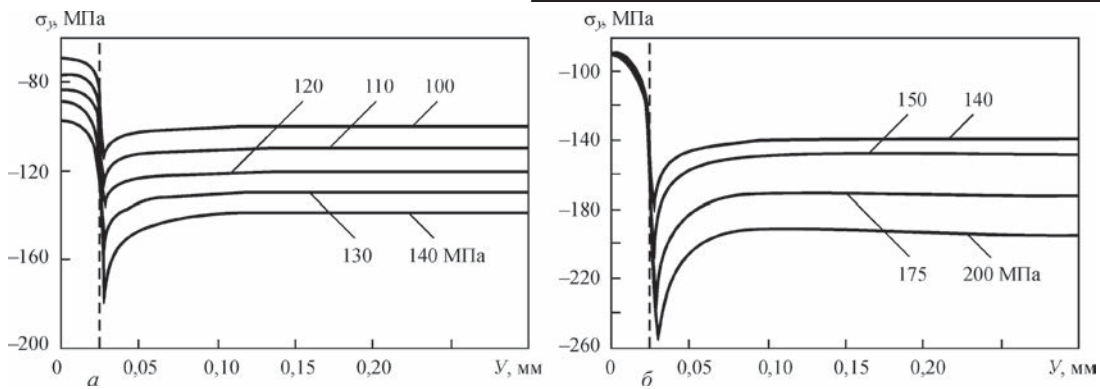


Рис. 5. Эпюры осевых напряжений вдоль образующей при осевых нагрузках 100...130 МПа (а) и 140...200 МПа (б)

жении жесткости НС в основном металле вблизи прослойки и снижении его прочности (разупрочнении) сохраняются как при упругом, так и пластическом нагружении в широком диапазоне нагрузок.

Для определения влияния уровня предела текучести прослойки на установленные закономерности был рассмотрен также вариант прослойки с более высоким пределом текучести 150 МПа.

Прикладывалась осевая нагрузка 150 МПа, т. е. равная пределу текучести прослойки, 200 и 250 МПа, которая превышала предел текучести прослойки (степень перегрузки), соответственно в 1,33 и 1,67 раза.

Анализ эпюр эквивалентных напряжений вдоль стыка при таких условиях нагружения и их сравнение с предыдущим вариантом узла (предел текучести прослойки 100 МПа) показал, что характер эпюр как в основном материале, так и в прослойке сохраняется. В основном материале на большей части стыка эквивалентные напряжения не изменяются, оставаясь на уровне напряжений от приложенной нагрузки. У кромки стыка они увеличиваются до 163, 220 и 295 МПа при нагружении 150, 200 и 250 МПа, соответственно. Коэффициенты жесткости напряженного состояния в основном металле на большей части стыка остаются на уровне 1,0, а у кромки стыка при нагрузке 150 МПа (степень перегрузки прослойки $K_{пер} = 1,0$) коэффициент жесткости напряженного состояния основного металла $K_{ж} = \sigma_y / \sigma_{эkv} = 150 / 163 = 0,92$, что полностью совпадает с вариантом узла с пределом текучести 100 МПа при той же степени перегрузки. Аналогичные результаты получены и при нагрузках 200 и 250 МПа.

В прослойке на большей части стыка эквивалентные напряжения также остаются постоянными, на уровне ниже предела текучести (107 и 143 МПа) при степени перегрузки прослойки 1,0 и 1,33 и на уровне предела текучести (150 МПа) при степени перегрузки прослойки 1,67.

При нагрузке 150 МПа (степень перегрузки прослойки $K_{пер} = 1,0$) коэффициент жесткости напряженного состояния прослойки $K_{ж} = 150 / 107 =$

$= 1,40$, что практически совпадает с результатом 1,41, полученным для узла с прослойкой с пределом текучести 100 МПа. Аналогичная картина и при нагрузках 200 и 250 МПа, при которых $K_{ж} = 200 / 143 = 1,40$ и $K_{ж} = 250 / 150 = 1,67$, соответственно, что полностью совпадает с результатами, полученным для узла с прослойкой с пределом текучести 100 МПа.

У кромки стыка при малой степени перегрузки прослойки (степень перегрузки 1,0 и 1,33), когда прослойка деформируется упруго, эквивалентные напряжения возрастают до 113 и 150 МПа, соответственно возрастает и коэффициент жесткости напряженного состояния $K_{ж} = 150 / 113 = 1,33$ и $K_{ж} = 200 / 150 = 1,33$, что также полностью совпадает с упругой стадией работы прослойки с пределом текучести 100 МПа.

Следует иметь в виду, что полученные закономерности сохраняют свою силу только при условии работы основного металла в упругой стадии. Для этого он должен иметь предел текучести выше максимальной прикладываемой к узлу осевой нагрузки. Необходимая степень превышения зависит от степени перегрузки мягкой прослойки и соответствующего ей коэффициента разупрочнения основного металла. По данным настоящей работы при степени перегрузки прослойки равной 2,0 коэффициент разупрочнения основного металла составляет 0,83, т. е. предел текучести основного металла для обеспечения его упругой работы должен быть больше $200 / 0,83 = 241$ МПа, т. е. превышать предел текучести прослойки (100 МПа) не менее, чем в 2,4 раза. При большей нагрузке появляются пластические деформации и в основном металле, их влияние на НС узла требует отдельного изучения.

Таким образом, при количественной оценке поведения узлов с мягкими прослойками, имеющими различные значения предела текучести, при разных уровнях осевых нагрузок удобно использовать понятие степень перегрузки прослойки, которая равна отношению величины осевой нагрузки к пределу текучести материала прослойки ($K_{пер} = \sigma_y / \sigma_{Tпр}$).

При достаточно высоком пределе текучести основного материала, превышающем уровень напряжений от приложенной нагрузки, когда упругопластически деформируется только мягкая прослойка, полученные закономерности разупрочнения основного металла и упрочнения мягкой прослойки сохраняют силу как в упругой, так и пластической стадиях работы материала прослойки при различных уровнях ее предела текучести и приложенной осевой нагрузки.

Выводы

1. При нагружении узла с мягкой прослойкой осевой нагрузкой в материале прослойки и в небольшой зоне основного металла, прилегающей к прослойке вблизи ее кромки, формируется объемное НС. Это объясняет изменение параметров прочности и пластичности металла, найденных в условиях линейного напряженного состояния, т. е. упрочнение или разупрочнение основного металла и прослойки.

2. Установлено, что коэффициент жесткости напряженного состояния, определяющий степень упрочнения или разупрочнения прослойки и основного металла, в материале прослойки в упругой стадии постоянный, для принятых вариантов сочетания упругих свойств равен 1,35. В пластической стадии $K_{ж}$ линейно растет, достигая величины 1,97 при нагрузке вдвое превышающей предел текучести материала прослойки при стандартных испытаниях.

3. Коэффициент разупрочнения основного металла вблизи кромки стыка с прослойкой зависит не только от свойств прослойки, но и от степени ее перегрузки, для рассмотренных вариантов постепенно от 0,925 при упругом деформировании прослойки приближаясь к 0,83 при увеличении коэффициента ее перегрузки до 2,0.

4. Максимальные осевые напряжения, заметно превышающие уровень напряжений от приложенной внешней нагрузки, возникают на образующей узла в основном металле в непосредственной близости от стыка с прослойкой. В случае достаточного упрочнения мягкой прослойки разрушение может произойти по более прочному основному металлу, где разупрочнение соединяемого материала сочетается с повышением осевых напряжений.

Список литературы

1. Бакши О. А., Шрон Р. З. (1962) Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой. *Сварочное производство*, **5**, 6–10.
2. Бакши О. А., Качанов Л. М. (1965) О напряженном состоянии пластичной прослойки при осимметричной деформации. *Изв. АН СССР. Механика*, **2**, 134–137.
3. Бакши О. А., Шрон Р. З. (1971) О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой. *Сварочное производство*, **3**, 3–5.

4. Махненко В. И., Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В. (2009) Напряженно-деформированное состояния при диффузионной сварке материалов с разными физико-механическими свойствами. *В Сб. тр. четвертой междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 27–30 мая 2008 г., пос. Кацивели, Украина. Махненко В. И. (ред.). Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины*, сс. 95–102.
5. Махненко В. И., Квасницкий В. В. (2009) Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой. *Автоматическая сварка*, **8**, 11–16.
6. Колесар И. А., Ермолаев Г. В. (2014) Напряженно-деформированное состояние при силовом и температурном нагружении узлов из разнородных сталей с мягкой прослойкой. *Там же*, **8**, 23–27.
7. Ermolaev G. V., Martynenko V. A., Olekseenko S. V. et al. (2017) Effect of the Rigid Interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under Thermal Loading. *Strength of Materials*, **49**, **3**, 422–428.
8. Копельман Л. А. (2010) *Основы теории прочности сварных конструкций: Учебное пособие. 2-е изд.* Санкт-Петербург, Изд-во «Лань».
9. Ермолаев Г. В., Квасницкий В. В., Квасницкий В. Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Хорунов В. Ф., Квасницкий В. Ф. (ред-и). Миколаїв, НУК.

References

1. Bakshi, O.A., Shron, R.Z. (1962) Strength at static tension of welded joints with soft interlayer. *Svarochn. Proizvodstvo*, **5**, 6-10 [in Russian].
2. Bakshi, O.A., Kachanov, L.M. (1965) On stress state of plastic interlayer at axisymmetric deformation. *Izv. AN SSSR. Mekhanika*, **2**, 134-137 [in Russian].
3. Bakshi, O.A., Shron, R.Z. (1971) On calculated evaluation of strength of welded joints with soft interlayer. *Svarochn. Proizvodstvo*, **3**, 3-5 [in Russian].
4. Makhnenko, V.I., Kvasnytskyi, V.V., Yermolayev, G.V. (2009) Stress-strain state in diffusion welding of materials with different physico-mechanical properties. In: *Proc. of 4th Intern. Conf. on Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes (27-30 May 2008, Katsiveli, Ukraine)*. Ed. by V.I. Makhnenko. Kiev, PWI, 95-102.
5. Makhnenko, V.I., Kvasnytskyi, V.V. (2009) Peculiarities of formation of stress-strain state in diffusion bonds between dissimilar materials. *The Paton Welding J.*, **8**, 7-11.
6. Kolesar, I.A., Yermolayev, G.V. (2014) Stress-strain state at force and temperature loading of assemblies from dissimilar steels with soft interlayer. *Ibid.*, **8**, 21-25.
7. Yermolaev, G.V., Martynenko, V.A., Olekseenko, S.V. et al. (2017) Effect of the rigid interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under thermal loading. *Strength of Materials*, **49**(3), 422-428.
8. Kopelman, L.A. (2010) *Fundamentals of strength theory of welded joints: Manual*. 2nd Ed. St-Petersburg, Izd-vo Lan [in Russian].
9. Yermolayev, G.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytsky, V.F. et al. (2015) *Brazing of materials*. Ed. by V.F.Khorunov et al. Mykolayiv, NUK [in Ukrainian].

В. В. Квасницкий^{1,3}, В. Ф. Квасницкий², Dong Chunlin³,
М. В. Матвієнко², Г. В. Ермолаєв²

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова. 54025, м. Миколаїв,

просп. Героїв України, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

³China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding, Guangzhou,
P. R. China. E-mail: dchunlin@163.com

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ЗВАРНИХ ТА ПАЯНИХ ВУЗЛІВ
З ОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З М'ЯКИМ ПРОШАРКОМ
ПРИ ОСЬОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Методом комп'ютерного моделювання досліджено напружений стан в вузлах, отриманих дифузійним зварюванням і пайкою, під дією осьового навантаження. Розглянуто циліндричні вузли зі сталі з прошарком міді з навантаженням вище межі текучості міді. Показано, що в результаті формування складного напруженого стану рівень еквівалентних напружень в прошарку знижується в порівнянні з доданим осьовим навантаженням і підвищується в невеликій зоні основного металу поблизу зовнішньої поверхні у стику з прошарком, що викликає ефект зміцнення (розвантаження) прошарку і знеміцнення (перевантаження) основного металу. Отримано кількісні залежності ступеня зміцнення прошарку і знеміцнення основного металу від величини зовнішнього навантаження. Встановлено, що в пружнопластичній стадії навантаження вузла знеміцнення основного металу більш виражено, ніж в пружній. Ступінь зміцнення прошарку в пружній стадії її роботи не залежить від величини зовнішнього навантаження, а в пружнопластичній стадії зростає пропорційно навантаженню. Бібліогр. 9, рис. 5.

Ключові слова: зварні і паяні вузли, м'який прошарок, комп'ютерне моделювання, напружений стан, силове навантаження

V.V. Kvasnitskii^{1,3}, V.F. Kvasnitskii², Dong Chunlin³,
M.V. Matvienko², G.V. Ermolaev²

¹NTUU «Igor Sikorskii Kiev Polytechnic Institute».

37 Pobedi prosp., 03056, Kiev. E-mail: kvas69@ukr.net
²Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
9 Heroev Ukrainy prosp., 54025, Nikolaev.
E-mail: welding @nuos.edu.ua
³China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding,
Guangzhou, P.R.China. E-mail: dchunlin@163.com

STRESSED STATE OF WELDED AND BRAZED
COMPONENTS FROM SIMILAR MATERIALS WITH
A SOFT INTERLAYER UNDER AXIAL LOADING

Computer modeling method was used to study the stressed state in components, manufactured by diffusion welding and brazing, under the impact of axial load. Cylindrical components from steel with a copper interlayer are considered under loading above the copper yield point. It is shown that formation of a complex stressed state resulted in the level of equivalent stresses decreasing in the interlayer compared to the applied axial load, and increasing in a small zone of base metal near the outer surface at the butt with the interlayer that causes the effect of strengthening (unloading) of the interlayer and softening (overloading) of base metal. Quantitative dependencies of the degree of interlayer strengthening and base metal softening on outer load magnitude were derived. It is found that at the elastoplastic stage of component loading base metal softening is less pronounced, than at the elastic stage. Degree of interlayer strengthening at the elastic stage of its work does not depend on the magnitude of outer load, and at the elastoplastic stage it is increased in proportion to the load. 9 Ref., 5 Fig.

Keywords: welded and brazed components, soft interlayer, computer modeling, stressed state, force loading

Поступила в редакцію 12.02.2018

16 - 18 October 2018

Fair and Exhibition Centre
expoSilesia
www.exposilesia.pl

60th
International
Welding Conference
Organizer:
Institute of Welding

ExpoWELDING

International Welding Fair

ul. Braci Mieroszewskich 124 | 41-219 Sosnowiec | expowelding@exposilesia.pl



Международная Ассоциация «Сварка» (г. Киев) организует участие украинских компаний на коллективном стенде в международной сварочной выставке «ExpoWELDING 2018», г. Сосновец, Польша, 16-18 ноября 2018 г. Выставка проводится один раз в два года и является крупнейшей сварочной выставкой в Восточной Европе. По вопросам участия в выставке «ExpoWELDING 2018» на коллективном стенде просьба обращаться: тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, E-mail: journal@paton.kiev.ua. Статья, посвященная предыдущей выставке «ExpoWELDING 2016» и участием в ней украинских компаний на коллективном стенде, была опубликована в журнале «Автоматическая сварка» № 12, 2016, стр. 63-67 и находится в открытом доступе по ссылке: <http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2016/as201612part.pdf>.