

INFLUENCE OF INTERLAYER DIMENSIONAL CHARACTERISTICS ON STRESS-STRAIN STATE OF CYLINDRICAL NODES

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УЗЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОМЕТРИИ ПРОСЛОЙКИ

Hennadii V. Yermolaiev

gennadii.yermolaiev@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8903-5669

Iryna A. Kolesar

iryna.kolesar@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-9406-5192

Г. В. Ермолаев,

канд. техн. наук, проф. НУК;

И. А. Колесар,

магистр

National University of Shipbuilding, Mykolayiv

Національний університет кораблебудування, г. Николаев

Abstract. The rational design of welded and brazing nodes with soft interlayers is discussed. The research aim is to determine the regularities of influence of the relative thickness and the degree of elongation of soft interlayers on the formation of the stress-strain state of the welded and brazing joints in the elastic deformation stage. The influence of the relative thickness and the degree of elongation of the interlayer is studied on the cylindrical nodes and models with the soft (low stiffness) interlayer, in which the diameter and the height of the node changed at a constant thickness of the interlayer. In addition, the ratio of the overall height h to its diameter d remained unchanged and equal to 1 ($d/h = 1$), and the degree of elongation of the interlayer b/d and its relative thickness b/h changed from 1/10 to 1/100. The nodes were loaded with the axial compression by the pressure of 40 MPa. The elastic axisymmetric problem is solved using the finite element software package ANSYS. The softening effects (the reloading) of the basic metal near the soft interlayer and the hardening (the unloading) of the interlayer material are determined. The first effect increases with the increase of the relative thickness of the interlayer, the second effect increases with its reduction. The research results can be applied to the design of the new equipment from heterogeneous structures which operate in complex loading conditions (vibration, elevated and cryogenic temperatures, cyclic loading etc.), the technology of which comprises the introduction of the soft interlayers between the basic metals. The determined regularities allow one to control the processes of formation of the stress-strain state of welded and brazing joints with the soft interlayers.

Keywords: diffusion and brazing joints, computer simulation, state of stress, soft interlayer.

Аннотация. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние при нагружении узлов из разнородных материалов в упругой стадии. Установлено влияние относительной толщины прослойки на напряженно-деформированное состояние узла.

Ключевые слова: диффузионные и паяные соединения, компьютерное моделирование, напряженное состояние, мягкая прослойка.

Анотация. Розглянуто напружено-деформований стан при навантаженні вузлів з різнорідних матеріалів у пружній стадії. Установлено вплив відносної товщини прошарку на напружено-деформований стан вузла.

Ключові слова: дифузійні і паяні з'єднання, комп'ютерне моделювання, напружений стан, м'який прошарок.

REFERENCES

- [1] Bakshi O.A., Shron R.Z. O raschetnoy otsenke prochnosti svarnykh soedineniy s myagkoy prosloykoy [On the estimate of welded joints strength with soft interlayer]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 1971, no. 3, pp. 3–5.
- [2] Bakshi O.A., Shron R.Z. Prochnost pri staticheskom rastyazhenii svarnykh soedineniy s myagkoy prosloykoy [Strength in static tension of welded joints with soft layer]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 1962, no. 5, pp. 6–10.

- [3] Bakshi O.A., Zaynullin P.C. O snyatii svarochnykh napryazheniy v soedineniyakh s mekhanicheskoy neodnorodnostyu prilozheniem vneshney nagruzki [On the removal of welding stresses in joints with mechanical heterogeneity by application of external load]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 1973, no. 7, pp. 3–7.
- [4] Bakshi O.A., Kachanov L.M. O napryazhenom sostoyanii plastichnoy prosloyki pri osimmetrichnoy deformatsii [On the stressed state of the plastic interlayer in axisymmetric deformation]. *Izvestiya AN SSSR Mekhanika – Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Mechanics*, 1965, no. 2, pp. 134–137.
- [5] Bakshi O.A., Anisimov Yu.I., Zaynullin P.C. [et al.]. Prochnost i deformatsionnaya sposobnost svarykh soedineniy s kompozitsionnoy myagkoy prosloykoy [Strength and deformation capacity of welded joints with composite soft layer]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 1974, no.10, pp. 3–5.
- [6] Kvasnitskiy V.V., Yermolaev G.V., Kvasnitskiy V.F., Matvienko M.V., Labartkava A.I. Vliyaniye sootnosheniya zhestkostey materialov na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye pri diffuzionnoy svarke i payke uzlov iz raznorodnykh materialov [Effect of the ratio of materials strength on the stress-strain state in diffusion welding and brazing of nodes from dissimilar materials]. *Zb. nauk. prats NUK [Collection of Scientific Publications NUS]*, 2011, no.6, issue 441, pp. 23–31.
- [7] Kvasnitskiy V.V., Yermolaev G.V., Matvienko M.V. Zakonomernosti formirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri diffuzionnoy svarke raznorodnykh materialov primenitelno k uzlam tsilindr–tsilindr i vtulka–vtulka [Principles of formation of the stress-strain state in diffusion welding of dissimilar materials applied to cylinder–cylinder and liner–liner nodes]. *Zb. nauk. prats NUK [Collection of Scientific Publications NUS]*, 2007, no. 5, issue 416, pp. 57–65.
- [8] Kvasnytskyi V.V., Yermolaiev H.V., Kolesar I.A. Napruzhenno-deformovanyi stan zvarnykh ta spaianykh ziednan riznorodnykh materialiv odnakovoi zhorstkosti z promizhnymy prosharkamy [The stress-strain state of welded and brazing joints of dissimilar materials of the similar hardness with interlayers]. *Zb. nauk. prats NUK [Collection of Scientific Publications NUS]*, 2011, no. 5, issue 440, pp. 36–43.
- [9] Kolesar I.A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarykh i payanykh uzlov iz raznorodnykh materialov s promezhutochnymi prosloykami pri temperaturnom i silovom nagruzenii [Study of the stress-strain state of welded and brazing joints from dissimilar materials with interlayers in temperature and strength load]. *Materialy II Vseukrainskoi naukovno-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv «Zvariuvannia ta sporidneni protsesy i tekhnologii» (4.09-8.09 2012)* [Proceedings of the second All-Ukrainian Scientific and Engineering Conference of Young Scientists and Students «Welding and related processes and technologies»]. Mykolaiv, 2012, pp. 119–122.
- [10] Trykov Yu.P., Gurevich L.M., Shmorgun V.G., Bogdanov A.I., Kiselev O.S. O realizatsii ravnoprochnosti koltsevykh shvov (myagkikh prosloek) raznorodnykh trub i sudov [On the implementation of equal strength of girth welds (soft interlayers) of dissimilar pipes and vessels]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Volgograd State Technical University], 2010, no. 4, issue 64, 188 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Диффузионная сварка (ДС) и пайка широко применяются для соединения многих материалов, которые не подлежат сварке плавлением, в том числе металлов с неметаллами. При ДС для активации процессов образования соединения применяют промежуточные прокладки. В паяных узлах промежуточной прокладкой является припой, который, как правило, имеет физико-механические свойства (ФМС), отличные от основного материала. Одна из проблем, возникающих при этом, – несущая способность таких узлов [1–4, 10].

Металл прослоек, как правило, имеет пониженные характеристики жесткости или прочности по сравнению с основным металлом. При определенных условиях мягкие прослойки могут не снижать работоспособность сварных соединений [10]. Задаче о напряженном состоянии, прочности и деформационной

способности мягкой прослойки посвящено достаточно большое количество работ [1–4, 8, 10].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В последние годы в сварочной литературе появился ряд публикаций, посвященных проблеме работоспособности сварных соединений с мягкой прослойкой, в которых были рассмотрены принципы рационального проектирования, обеспечивающего равнопрочность соединения и эффект контактного упрочнения [9]. Проведенный в [5–8] анализ позволил установить ряд закономерностей формирования НДС состояния в узлах из разнородных материалов, однако отсутствуют данные о влиянии толщины мягкой прослойки. Таким образом, исследование влияния толщины мягкой прослойки на НДС состояния узлов при нагружении осевой нагрузкой актуально.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – установить закономерности влияния относительной толщины и степени вытянутости мягких промежуточных прослоек на формирование НДС состояния сварных и паяных соединений в упругой стадии деформирования.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследования проводились методом компьютерного моделирования с использованием программного

комплекса ANSYS (10-я версия) на цилиндрических узлах и моделях с мягкой (малой жесткости) прослойкой, в которых при постоянной толщине прослойки $b = 1$ мм диаметр d и высота узла h менялись от 10 до 100 мм. При этом отношение общей высоты узла h к диаметру d оставалось неизменным и равным 1 ($d/h = 1$), а степень вытянутости прослойки b/d и ее относительная толщина b/h изменялись от 1/10 до 1/100 (табл. 1).

Таблица 1. Варианты узлов с различной относительной толщиной (степенью вытянутости) прослойки

Номер варианта	1	2	3	4	5	6
Толщина прослойки b , мм	1	1	1	1	1	1
Высота узла h , мм	10	20	40	60	80	100
Диаметр узла d , мм	10	20	40	60	80	100
Относительная толщина прослойки b/d	0,1	0,05	0,025	1/60 (0,0167)	0,0125	0,01

Узлы нагружались осевым сжатием давлением 40 МПа. Вследствие симметрии относительно середины толщины прослойки модель строилась для верхней половины узла (рис. 1). Решалась упругая осесимметричная задача. Для соединяемых материалов модули упругости приняты одинаковыми – $E_{OM} = 2 \cdot 10^5$ МПа (например, никелевые сплавы и стали), для материала прослойки $E_{np} = 1 \cdot 10^5$ МПа (например, медь). Коэффициенты Пуассона для всех материалов $\mu = 0,3$. Варианты размеров исследованных моделей приведены в табл. 1.

так и прослойки (см. рис. 4 и 5) меняется мало. Для всех вариантов характерно наличие зоны больших градиентов всех составляющих напряжений вблизи стыка соединяемых материалов с прослойкой, особенно вблизи периферийных участков прослойки, прилегающих к боковой поверхности узла. Размеры этой зоны практически не зависят от степени вытянутости прослойки и составляют около двух ее толщин (рис. 6 и 7). Соответственно, в варианте 1 (относительная толщина 1/10) ее протяженность соизмерима с половиной радиуса узла. При уменьшении относительной толщины прослойки относительная протяженность этой зоны уменьшается и становится менее 1/20 радиуса.

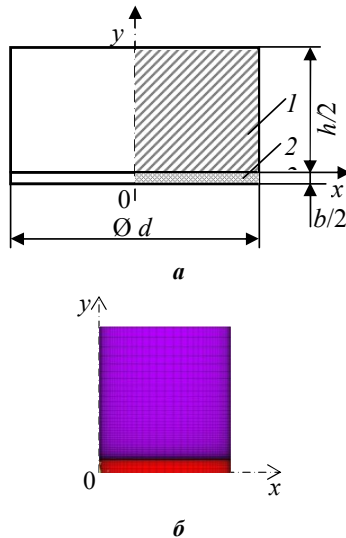


Рис. 1. Геометрическая (а) и конечно-элементная (б) модели: 1 – основной металл; 2 – материал прослойки

Анализировались поля и эпюры распределения нормальных (радиальных, осевых, окружных), касательных и эквивалентных (по Мизесу) напряжений, а также уровень напряжений в различных участках стыка: в основном металле и материале прослойки, на периферии и в средней части стыка.

Сравнение полей напряжений (рис. 2–5) показало, что при изменении степени вытянутости прослойки характер полей как узла в целом (см. рис. 2 и 3),

Анализ эпюр распределения напряжений вдоль границы раздела в соединяемых материалах и прослойке (см. рис. 6 и 7) также подтверждает, что все составляющие напряжений остаются практически постоянными на большей части длины прослойки, резко возрастают или уменьшаются только в периферийной зоне. Исключение составляют варианты 1 и 2 с большой относительной толщиной (1/10 и 1/20), в которых возрастание или уменьшение напряжений начинается практически уже на оси цилиндра. Уровень напряжений в средней части стыка также заметно отличается только в вариантах 1 и 2, в вариантах с большой степенью вытянутости (с относительной толщиной меньше 1/40) он практически одинаков.

Радиальные напряжения в основном материале растягивающие, а в материале прослойки – сжимающие. В основном металле они возрастают от 0,2...2,0 МПа в центре узла до 7...10 МПа на периферии. При этом с увеличением относительной толщины прослойки радиальные напряжения в средней части стыка несколько возрастают, а на периферии уменьшаются.

В материале прослойки картина обратная: максимальные сжимающие напряжения в центре (около 8 МПа) уменьшаются до 1...2 МПа на периферии. С увеличением относительной толщины прослойки напряжения в средней части незначительно уменьшаются, а на периферии увеличиваются.

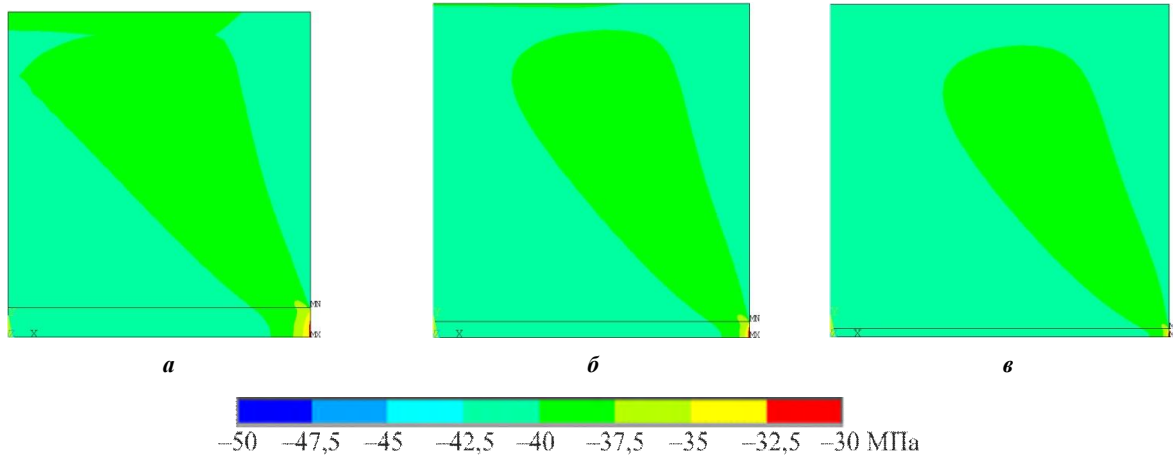


Рис. 2. Поля осевых напряжений в узлах с мягкой прослойкой (верхняя половина) при относительной толщине $b/d = 1/10$ (*a*), $1/20$ (*б*), $1/40$ (*в*)

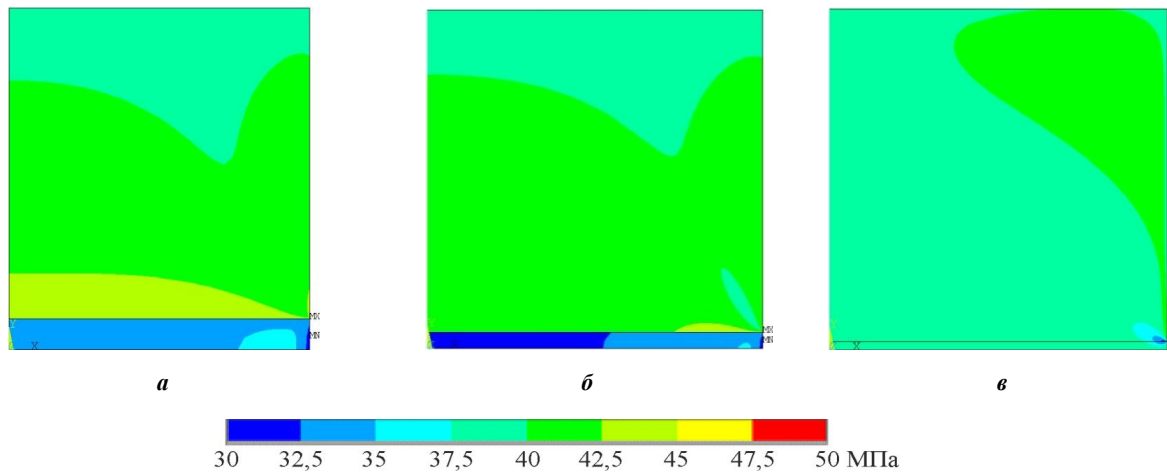


Рис. 3. Поля эквивалентных напряжений в узлах с мягкой прослойкой (верхняя половина) при относительной толщине $b/d = 1/10$ (*a*), $1/20$ (*б*), $1/40$ (*в*)

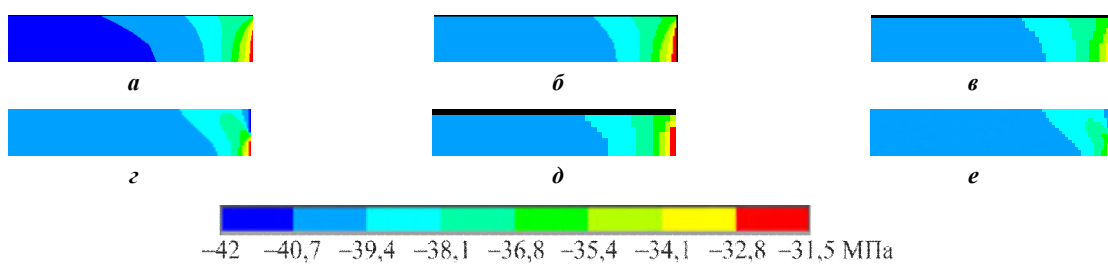


Рис. 4. Поля осевых напряжений в мягкой прослойке (верхняя половина) на участке 2,5 толщины от боковой цилиндрической поверхности узлов Ц-Ц при относительной ее толщине $b/d = 1/10$ (*a*); $1/20$ (*б*); $1/40$ (*в*); $1/60$ (*г*); $1/80$ (*д*) и $1/100$ (*е*)

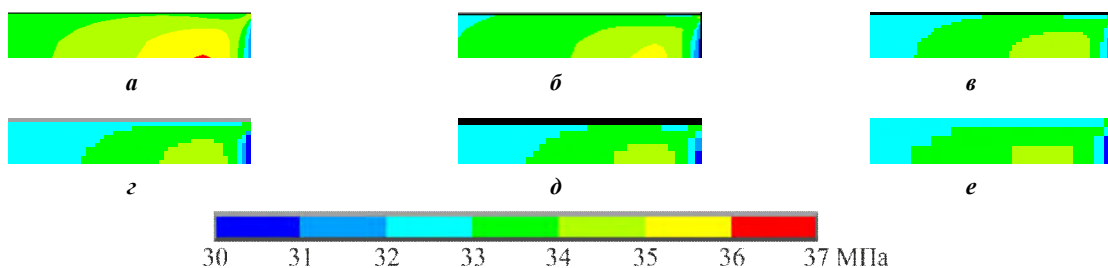


Рис. 5. Поля эквивалентных напряжений в мягкой прослойке (верхняя половина) на участке 2,5 толщины от боковой цилиндрической поверхности узлов Ц-Ц при относительной ее толщине $b/d = 1/10$ (*a*); $1/20$ (*б*); $1/40$ (*в*); $1/60$ (*г*); $1/80$ (*д*) и $1/100$ (*е*)

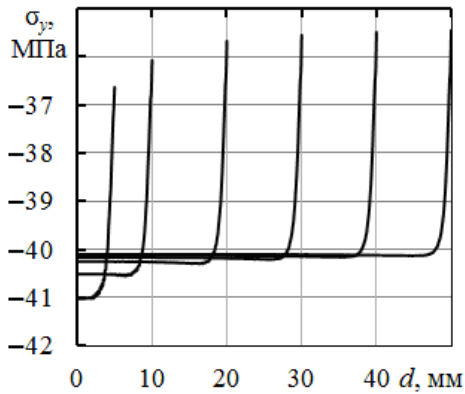


Рис. 6. Эпюры осевых напряжений по границе раздела основного материала и мягкой прослойки

Осевые напряжения – сжимающие на большей части длины стыка. В узлах с малой относительной толщиной прослойки (варианты 3–6) по уровню близки к 40 МПа (приложенное к узлу внешнее давление). В вариантах с большой относительной толщиной (варианты 1 и 2) эти напряжения несколько превышают 40 МПа. На узких участках (около двух толщин прослойки) на периферии стыка осевые напряжения резко уменьшаются до 35...37 МПа, в несколько большей степени – в материале прослойки. Уровень напряжений как в средней части стыка, так и на периферии практически не зависит от относительной толщины прослойки. Вдоль образующей по мере удаления от стыка напряжения снова уменьшаются и на расстоянии около пяти толщин прослойки становятся равными 40 МПа.

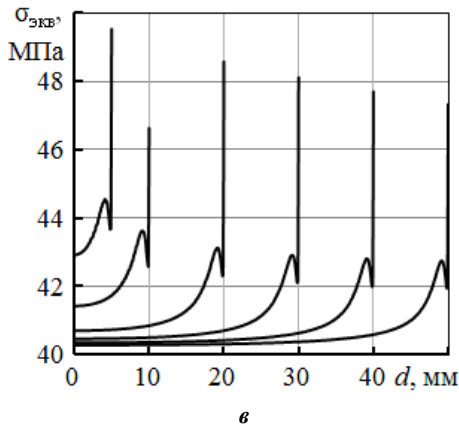
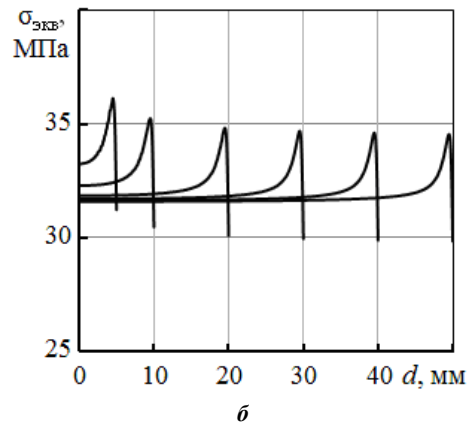
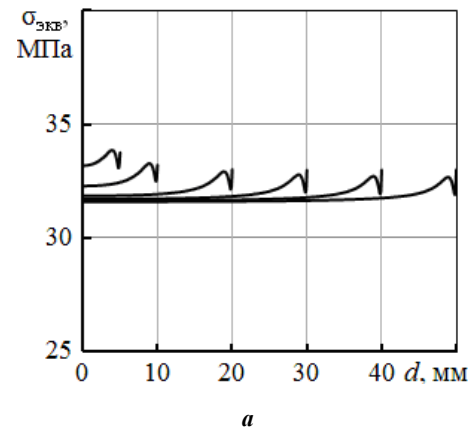


Рис. 7. Эпюры эквивалентных напряжений в материале мягкой прослойки по стыку с основным материалом (а), в ее средней части (б) и в основном материале на стыке с прослойкой (в) в узлах Ц–Ц

Окружные напряжения на большей части стыка по знаку и величине полностью совпадают с радиальными и несколько отличаются от них только на периферии.

Касательные напряжения, максимальные на периферии стыка, быстро убывают по мере удаления от нее и на расстоянии около десяти толщин прослойки обращаются в нуль. Уровень максимальных значений

этих напряжений одинаков (около 3,5 МПа) практически при всех относительных толщинах прослоек, и только в вариантах 5 и 6 (относительная толщина 0,0125 и 0,01) он несколько увеличивается.

Эквивалентные напряжения по уровню и характеру распределения вдоль стыка как в основном материале, так и в прослойке, практически одинаковы во всех вариантах, кроме вариантов с большой

относительной толщиной прослойки (0,1 и 0,05), где их уровень несколько увеличивается (см. рис. 7).

В основном металле на большей части длины стыка они остаются на уровне приложенного давления 40 МПа, увеличиваясь почти до 50 МПа на перифе-

рии на участке длиной около десяти толщин прослойки (см. рис. 7,б), т. е. здесь четко проявляется эффект разупрочнения (догрузки) основного металла вблизи мягкой прослойки, который увеличивается с ростом относительной толщины прослойки (рис. 8,а).

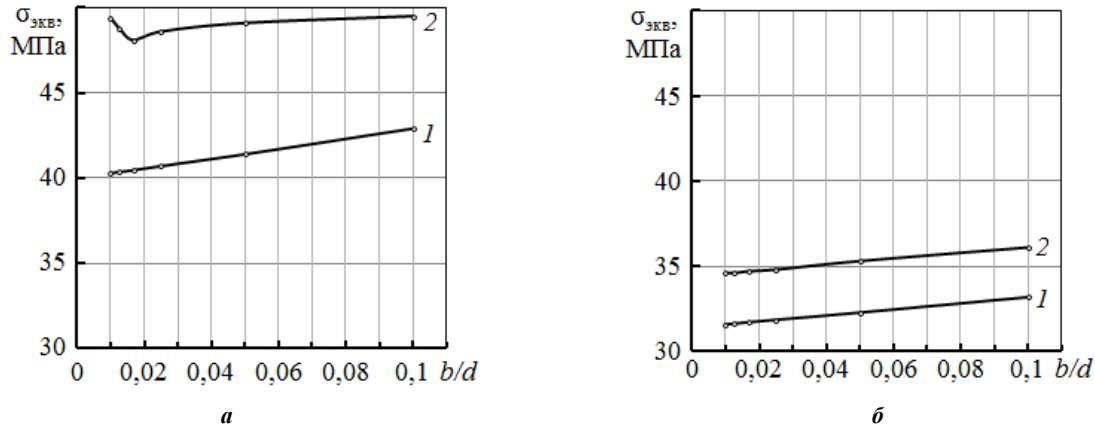


Рис. 8. Зависимость уровня эквивалентных напряжений в средней части (1) и на периферии (2) стыка от относительной толщины прослойки в основном материале (а) и материале прослойки (б)

В материале прослойки эквивалентные напряжения (32...35 МПа), напротив, заметно ниже приложенного давления 40 МПа, т. е. в прослойке также четко проявляется эффект «упрочнения» (разгрузки) мягкой прослойки. Этот эффект проявляется во всех вариантах узлов, несколько увеличиваясь с уменьшением относительной толщины прослойки (рис. 8,б).

ВЫВОДЫ

1. При изменении степени вытянутости (относительной толщины) мягкой прослойки в целом характер полей напряжений меняется мало. Для всех вариантов характерно наличие зоны больших градиентов всех составляющих напряжений вблизи периферийных участков стыка (прилегающих к боковой поверхности узла). Размеры этой зоны

практически не зависят от степени вытянутости прослойки и составляют около двух ее толщин.

2. В основном металле при нагружении осевой нагрузкой узлов с мягкой прослойкой проявляется эффект разупрочнения (догрузки) основного металла вблизи мягкой прослойки, выражающийся в увеличении до 20...25% эквивалентных напряжений на периферийных участках длиной около десяти толщин прослойки. Эффект возрастает с увеличением относительной толщины прослойки.

3. В материале прослойки проявляется эффект упрочнения (разгрузки), выражающийся в снижении эквивалентных напряжений на 10...20% на всей длине прослойки. Этот эффект проявляется во всех вариантах узлов, несколько увеличиваясь с уменьшением относительной толщины прослойки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бакши, О. А. О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой [Текст] / О. А. Бакши, Р. З. Шрон // Сварочное производство. – 1971. – № 3. – С. 3–5.
- [2] Бакши, О. А. Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой [Текст] / О. А. Бакши, Р. З. Шрон // Сварочное производство. – 1962. – № 5. – С. 6–10.
- [3] Бакши, О. А. О снятии сварочных напряжений в соединениях с механической неоднородностью приложением внешней нагрузки [Текст] // О. А. Бакши, Р. С. Зайнуллин / Сварочное производство. – 1973. – № 7. – С. 3–7.
- [4] Бакши, О. А. О напряженном состоянии пластичной прослойки при осесимметричной деформации [Текст] / О. А. Бакши, Л. М. Качанов / Изв. АН СССР. Механика. – 1965. – № 2. – С. 134–137.
- [5] Влияние соотношения жесткостей материалов на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке и пайке узлов из разнородных материалов [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, В. Ф. Квасницкий, М. В. Матвиенко, Ал. В. Лабарткава // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2011. – № 6 (441). – С. 23–31.

- [6] **Квасницький, В. В.** Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных материалов применительно к узлам цилиндр–цилиндр и втулка–втулка [Текст] / В. В. Квасницький, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2007. – № 5 (416). – С. 57–65.
- [7] **Квасницький, В. В.** Напружено-деформований стан зварних та спаяних з'єднань різнорідних матеріалів однакової жорсткості з проміжними прошарками [Текст] / В. В. Квасницький, Г. В. Ермолаєв, І. А. Колесар / Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2011. – № 5 (440). – С. 36–43.
- [8] **Колесар І. А.** Исследование напряженно-деформированного состояния сварных и паяных узлов из разнородных материалов с промежуточными прослойками при температурном и силовом нагружении [Текст] / И. А. Колесар // Матер. II Всеукр. наук.-техн. конф. молодых ученых та студентів «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 119–122.
- [9] О реализации равнопрочности кольцевых швов (мягких прослоек) разнородных труб и сосудов [Текст] / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун [и др.] / Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та : межвуз. сб. науч. ст. № 4 (64). – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. – С. 188.
- [10] Прочность и деформационная способность сварных соединений с композиционной мягкой прослойкой [Текст] / О. А. Бакши, Ю. И. Анисимов, Р. С. Зайнуллин [и др.] / Сварочное производство. – 1974. – № 10. – С. 3–5.

© Г. В. Ермолаєв, І. А. Колесар
Надійшла до редколегії 12.05.2014
Статтю рекомендує до друку
канд. техн. наук, проф. НУК *С. В. Драган*