

УДК 539.3

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНОМ ШВЕ, ОБРАЗУЮЩЕМСЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

А. Г. Колпаков, С. И. Ракин*

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
630102 Новосибирск, Россия

* Новосибирский государственный университет путей сообщения,
630049 Новосибирск, Россия
E-mails: algk@ngs.ru, rakinsi@ngs.ru

Показано, что сварной шов, образующийся при сварке взрывом, на микроуровне (при длине волны порядка нескольких сотен микрометров) имеет волнообразную геометрию. Проводится расчет концентрации напряжений, обусловленной локальной геометрией шва, для различных форм и амплитуд волны сварного шва и комбинаций соединяемых материалов.

Ключевые слова: упругость, концентрация напряжений, сварной шов, ячеечная задача.

DOI: 10.15372/PMTF20180322

Постановка задачи. При сварке взрывом поверхность раздела (сварного шва) на микроуровне имеет волнообразную геометрию. Длина волны составляет порядка нескольких сотен микрометров [1, 2]. Форма волны меняется от практически симметричной (синусоидальной) (рис. 1, а [3]) до волны с гребнем (рис. 1, в). Промежуточной является несимметричная форма волны (рис. 1, б). На макроуровне сварной шов имеет вид прямой линии.

При соединении двух тел по прямой линии (вид сварного шва на макроуровне) при деформации свариваемых фрагментов в области сварного шва возникли бы затухающие пограничные слои. Однако в действительности область раздела имеет волнообразную структуру на микроуровне, причем выделяется некоторая область волны P_0 (рис. 2), которую будем называть соединительной областью. Между соединительной областью и основным материалом напряженно-деформированное состояние имеет характер напряженно-деформированного состояния в пограничных слоях. Разделение зон с различным напряженно-деформированным состоянием невозможно. Описать напряженно-деформированное состояние одновременно в соединительной области и в пограничных слоях позволяет использование техники “локального возмущения” [4, 5]. Будем полагать, что поверхность раздела является периодической с периодом T по переменной x_2 (рис. 2). Вследствие периодичности сварного шва по переменной x_2 вся задача по этой переменной также является периодической.

Представляет интерес вопрос о типе свариваемых материалов и возможном изменении их свойств в сварном шве. Согласно данным, приведенным на рис. 3, микроструктура материалов при сварке взрывом меняется незначительно в отличие от случая сварки плав-

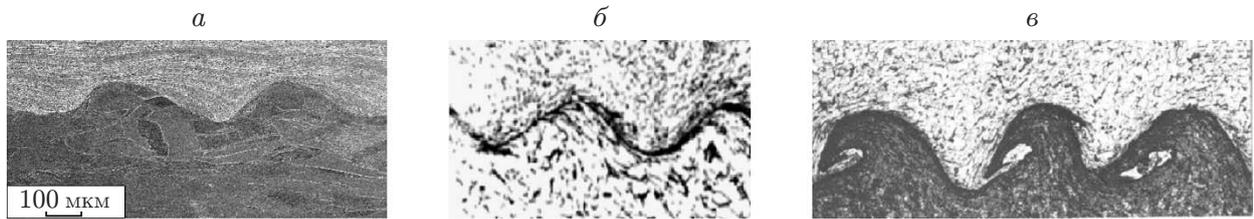


Рис. 1. Вид сварного шва на микроуровне:

a — симметричная волна, *б* — несимметричная волна, *в* — волна с гребнем

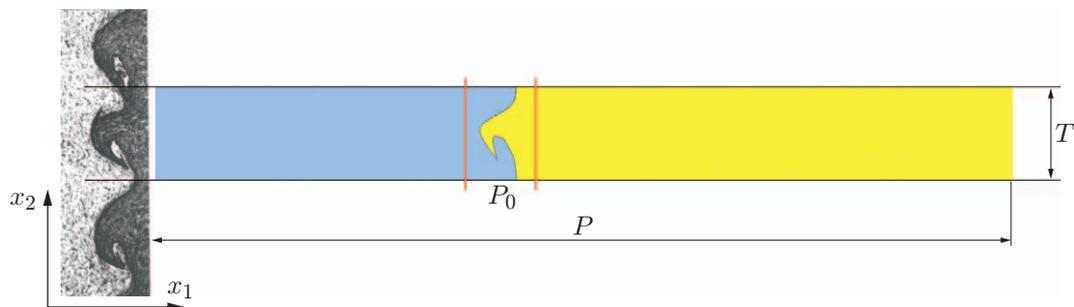


Рис. 2. Период P и область P_0 соединительного шва

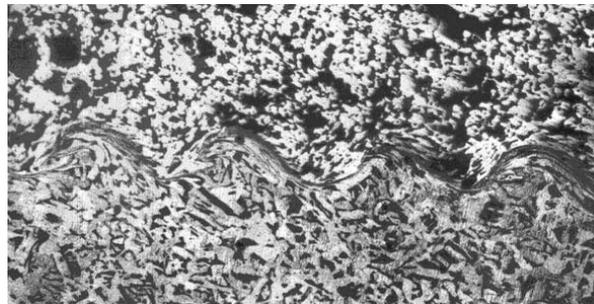


Рис. 3. Микроструктура материалов, свариваемых взрывом

лением [6]. Поэтому в первом приближении прочность сварного соединения определяется концентрацией напряжений, обусловленной различием значений упругих постоянных свариваемых материалов и волнообразной геометрией шва.

Данные об изменении свойств материалов (возникновении зон перемешивания и т. п.) в области шва приведены в работах [6, 7].

Приведем некоторые данные о размере зерна металлов. Размер зерна принимает значения в интервале $1000,0 \div 2,7$ мкм. Крупными зернами считаются зерна с диаметром порядка 62 мкм, мелкими — с диаметром $44,0 \div 2,7$ мкм [8]. Зерна алюминия имеют диаметр $10 \div 100$ мкм. Таким образом, материал является композиционным и в случае крупных зерен характерный размер неоднородности материала [8] сравним с размером волны сварного шва (≈ 100 мкм). В случае мелких зерен свариваемые материалы можно считать однородными [9].

Период волны сварного шва, размер зерен металлов являются микроскопическими, однако для них применимы модели классической механики сплошной среды [10]. Для расчета на микроуровне напряженно-деформированного состояния необходимо решить задачу теории упругости для материалов, соединяемых волнообразной линией периодического стро-

ения. При условии, что в соединяемых материалах имеется макроскопическое осредненное поле перемещений $\mathbf{u}_0(\mathbf{x})$, определяемое из решения макроскопической задачи о деформировании материалов, соединенных по макроскопически прямой (не волнообразной) линии, следуя [4, 5], решение задачи находим в виде

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}_0(\mathbf{x}) + \varepsilon \mathbf{u}_1(\mathbf{x}/\varepsilon).$$

Введем “быстрые” переменные $\mathbf{y} = \mathbf{x}/\varepsilon$ [11] и будем считать, что корректор $\varepsilon \mathbf{u}_1(\mathbf{x}/\varepsilon)$ представляет собой локальное возмущение, т. е. периодическую функцию с периодом T по переменной y_2 , где $\mathbf{y} = (y_1, y_2) = \mathbf{x}/\varepsilon$, обладающую свойством

$$\mathbf{u}_1(\mathbf{y}) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad |y_1| \rightarrow \infty.$$

Вследствие периодичности сварного шва по переменной y_2 вся задача по переменной y_2 также является периодической. Получаем следующую ячеечную задачу:

$$(a_{ijkl}(\mathbf{y})u_{1k,ly} + a_{ij\alpha\beta}(\mathbf{y})u_{0\alpha,\beta x}(\mathbf{x})),_{iy} = 0 \quad \text{в} \quad P, \tag{1}$$

$$\mathbf{u}_1(\mathbf{y}) \text{ периодическая по } y_2 \text{ с периодом } T, \quad \mathbf{u}_1(\mathbf{y}) \rightarrow 0 \text{ при } |y_1| \rightarrow \infty.$$

Задача (1) отличается от ячеечной задачи теории осреднения наличием условия затухания: $\mathbf{u}_1(\mathbf{y}) \rightarrow 0$ при $|y_1| \rightarrow \infty$ (в ячеечной задаче теории осреднения имеет место периодичность по всем переменным [11]). Это обуславливает существенные различия осредненных задач. Во-первых, в задаче о соединении макроскопические условия на шве не зависят от микроскопических свойств соединения [4, 5], которые в теории осреднения определяют осредненные коэффициенты [11]. Во-вторых, макроскопические деформации являются разрывными (именно им соответствует член $u_{0\alpha,\beta x}(\mathbf{x})$ в (1)). Вследствие невозможности применения процедуры разделения “быстрых” и “медленных” переменных (член $u_{0\alpha,\beta x}(\mathbf{x})$ рассматривается в качестве параметра и “выносятся” из задачи (1) как множитель), являющейся основной в классической теории осреднения [11], решается задача (1).

Результаты численных расчетов. В первом приближении можно считать, что структура сварного шва не зависит от переменной x_3 (направленной перпендикулярно плоскости рис. 1–3), поэтому ограничимся рассмотрением двумерной задачи (задачи о плоском деформированном состоянии). В качестве характеристики концентрации микроскопических напряжений используем концентрацию напряжений по Мизесу, значения которых часто используются в качестве критерия прочности пластических материалов, в частности металлов [10].

При “нарезке” материала на ячейки периодичности (эта “нарезка” определяется периодической структурой сварного шва) возникает задача о деформировании двух материалов, соединенных вдоль оси Oy . При этом при растяжении вдоль оси Ox и сдвиге макроскопические напряжения слева и справа от оси Oy являются непрерывными, макроскопические деформации — разрывными, при растяжении вдоль оси Oy напряжения слева и справа от оси являются разрывными, макроскопические деформации — непрерывными. Таким образом, имеют место деформации типа деформаций Фойгхта и Рейса, возникающие в слоистом материале, однако в рассматриваемом случае эти деформации локализованы вблизи сварного шва. При макроскопическом растяжении по оси Ox и сдвиге концентрация напряжений по Мизесу в окрестности сварного шва вычисляется по формуле

$$k(\mathbf{x}) = \sigma_M(\mathbf{x})/\sigma_M(\infty),$$

при макроскопическом растяжении по оси Oy — по следующим формулам:

— слева от сварного шва

$$k(\mathbf{x}) = \sigma_M(\mathbf{x})/\sigma_M|_{x_1=-\infty};$$

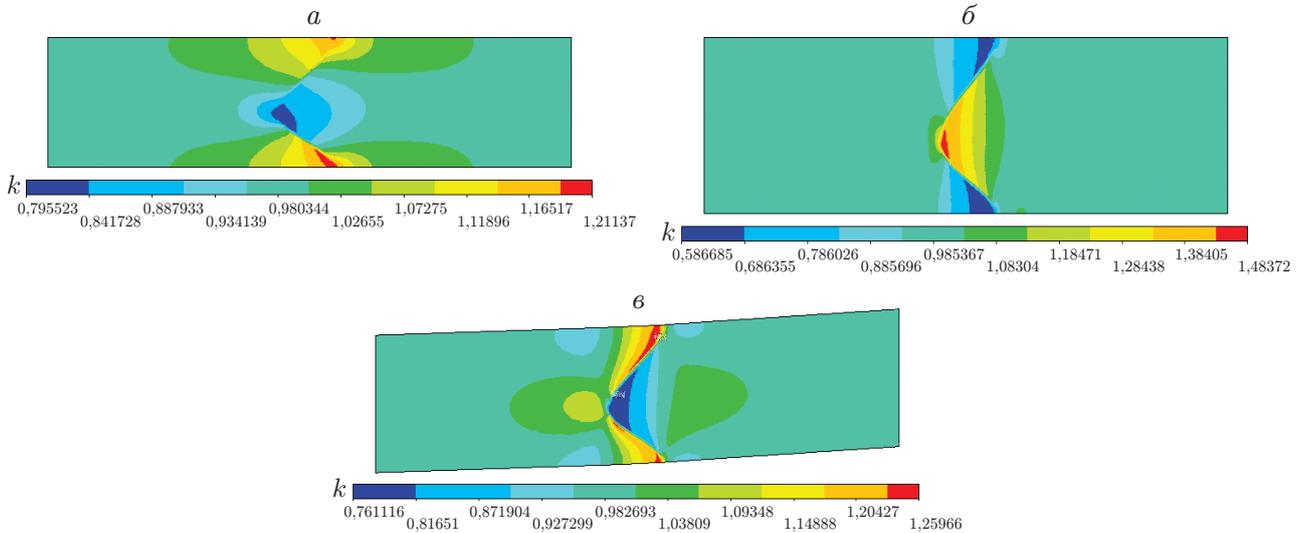


Рис. 4. Распределения концентрации напряжений по Мизесу для шва в виде симметричной волны при растяжении по оси Ox (a), растяжении по оси Oy (b) и сдвиге по оси Oy (v)

— справа от сварного шва

$$k(\mathbf{x}) = \sigma_M(\mathbf{x}) / \sigma_M|_{x_1=+\infty}.$$

Здесь σ_M — интенсивность напряжений; $\sigma_M|_{x_1=\pm\infty}$ — напряжения справа и слева от шва на расстояниях, “достаточных” для того, чтобы считать их значения постоянными. Согласно результатам численных расчетов эти расстояния равны $(3 \div 5)T$. Данная величина, как правило, используется для оценки протяженности пограничных слоев в соединениях материалов с незначительно различающимися значениями упругих постоянных. Для материалов с существенно различающимися значениями упругих постоянных эта оценка неприменима [12].

Максимальная концентрация напряжений по Мизесу определяется по формуле $k = \max_{\mathbf{x}} k(\mathbf{x})$.

Поверхность раздела строилась на основе данных обработки (измерений) приведенных на рис. 1 фотографий шлифов сварных швов различной формы: практически симметричной (синусоидальной), несимметричной, волны с гребнем.

Приведем результаты численных расчетов концентрации напряжений по Мизесу для трех типовых форм волн, образующихся при сварке взрывом. Расчеты проводились с использованием конечно-элементной программы ANSYS для следующих материалов: слева — медь (модуль Юнга $E_{\text{л}} = 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,35$), справа — алюминий (модуль Юнга $E_{\text{п}} = 0,5 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,34$).

Для шва в виде волны, форма которой близка к симметричной (см. рис. 1, a), результаты расчетов представлены на рис. 4. На рис. 5 приведены результаты численных расчетов концентрации напряжений по Мизесу для шва в виде несимметричной волны (см. рис. 1, b), на рис. 6 — для шва в виде волны с гребнем (см. рис. 1, v).

В табл. 1 приведены максимальные значения концентрации напряжений по Мизесу для трех основных типов поверхностей, образующихся при сварке взрывом. Приведенные данные свидетельствуют о достаточно малых ($1,1 \div 1,3$) значениях концентрации локальных напряжений во всех типовых швах, образующихся при сварке взрывом, при всех типах макроскопических внешних нагрузок.

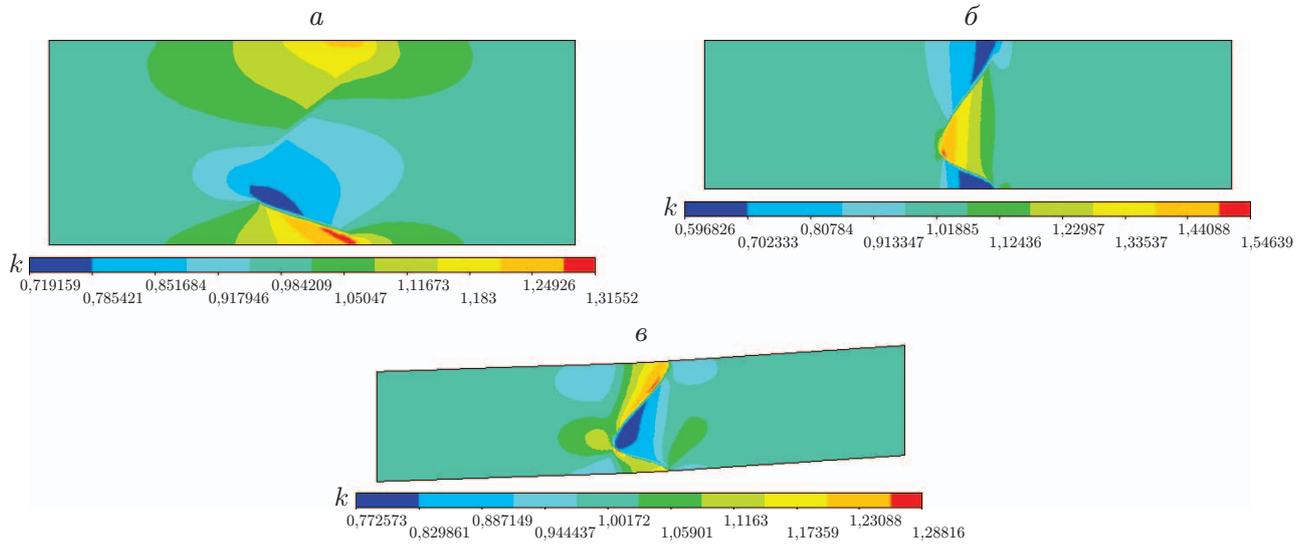


Рис. 5. Распределения концентрации напряжений по Мизесу для шва в виде несимметричной волны при растяжении по оси Ox (*a*), растяжении по оси Oy (*б*) и сдвиге по оси Oy (*в*)

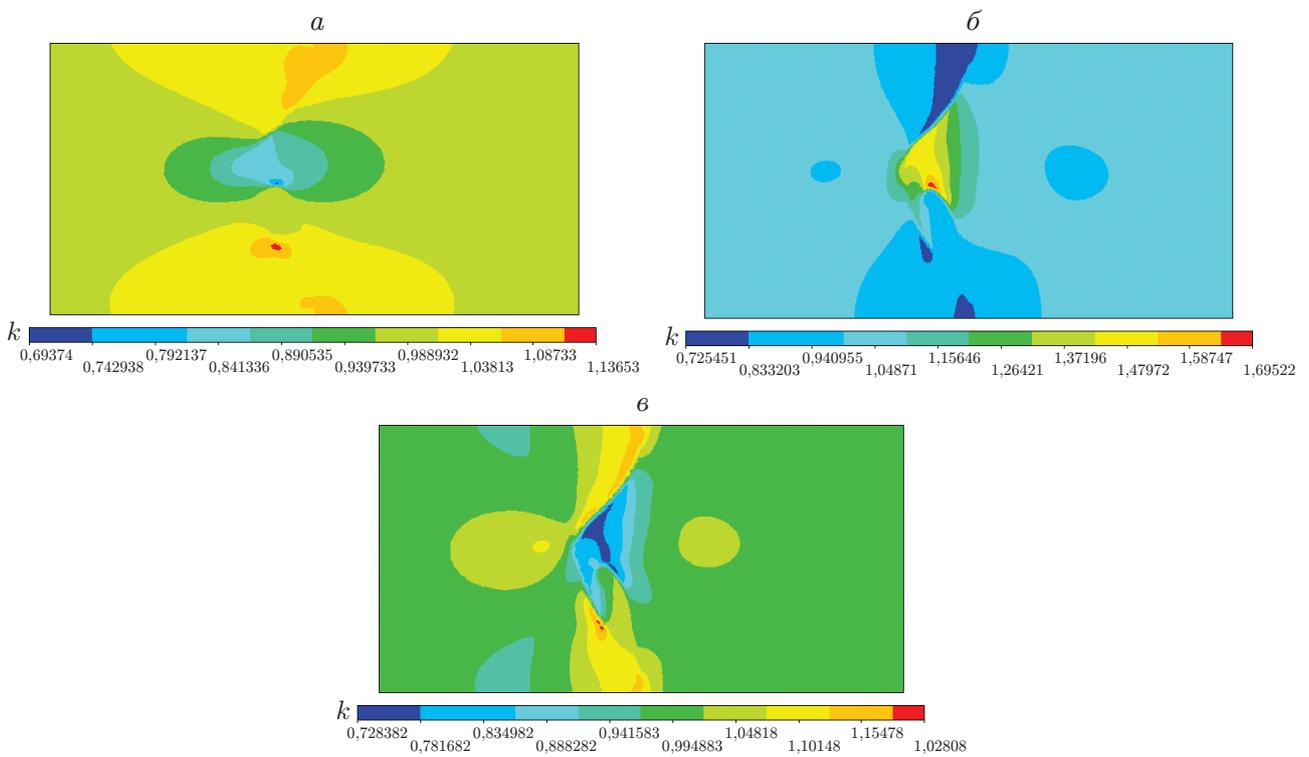


Рис. 6. Распределения концентрации напряжений по Мизесу для шва в виде волны с гребнем при растяжении по оси Ox (*a*), растяжении по оси Oy (*б*) и сдвиге по оси Oy (*в*)

Таблица 1

Максимальные значения концентрации напряжений по Мизесу k
для различных швов при различной деформации

Тип шва	k		
	Растяжение по оси Ox	Растяжение по оси Oy	Сдвиг по оси Oy
Симметричная волна	1,21	1,48	1,25
Несимметричная волна	1,31	1,54	1,28
Волна с гребнем	1,13	1,69	1,20

Таблица 2

Максимальная концентрация напряжений по Мизесу k для симметричной волны
при различных упругих характеристиках материала и амплитуде волны

$E_{\text{п}} \cdot 10^{-11}$	k					
	Сдвиг по оси Oy		Растяжение по оси Ox		Растяжение по оси Oy	
	$H/3$	H	$H/3$	H	$H/3$	H
0,9	1,024	1,035	1,012	1,035	1,036	1,070
0,8	1,053	1,079	1,023	1,070	1,076	1,150
0,7	1,086	1,127	1,034	1,109	1,122	1,242
0,6	1,121	1,191	1,049	1,156	1,174	1,349
0,5	1,165	1,288	1,063	1,207	1,239	1,482
0,4	1,213	1,430	1,087	1,267	1,313	1,639
0,3	1,282	1,647	1,111	1,341	1,401	1,829
0,2	1,360	1,996	1,140	1,430	1,509	2,069

Зависимость концентрации напряжений от упругих характеристик свариваемых материалов и амплитуды волны. В табл. 2–4 представлены результаты расчетов максимальных концентраций напряжений по Мизесу для трех рассматриваемых форм сварных швов (симметричная волна, несимметричная волна, волна с гребнем) и всех типов макроскопических деформаций (сдвиг по оси Oy , растяжение по оси Ox , растяжение по оси Oy) при различных значениях амплитуды (высоты) волны H и упругих характеристик материалов (модуль Юнга материала слева от шва равен $E_{\text{л}} = 10^{11}$ МПа, справа от шва — $E_{\text{п}}$).

Показанные на рис. 1 волны сварного шва имеют значительные амплитуды, поэтому расчеты проводились также для волн меньшей амплитуды. Амплитуда в расчетах уменьшалась в два или три раза по сравнению с рис. 1.

Результаты численных расчетов показывают, что концентрация напряжений в волнообразном шве в большей степени зависит от отношения модулей Юнга [12] свариваемых материалов и в меньшей — от геометрии волны (симметричная, несимметричная, с гребнем) и ее амплитуды. В случае если отношение модулей Юнга составляет порядка $0,4 \div 0,5$, максимальная концентрация напряжений по Мизесу в области волнообразной поверхности может достигать значения $k \approx 2 \div 3$, которое следует учитывать при оценке прочностных свойств сварного шва.

В случае если прочность каждого материала определяется критерием $\sigma_{\text{М}} = \sigma_{\text{л}}^*$, $\sigma_{\text{М}} = \sigma_{\text{п}}^*$ (пределы прочности по Мизесу материалов слева и справа от шва), прочность соединения в целом определяется условием $k_{\text{л}}\sigma_{\text{М}}|_{x_1=\mp\infty} = \sigma_{\text{л}}^*$, $k_{\text{п}}\sigma_{\text{М}}|_{x_1=\mp\infty} = \sigma_{\text{п}}^*$, где $\sigma_{\text{М}}|_{x_1=\mp\infty}$ — интенсивность напряжений, вычисленная на “бесконечном” (3–5 периодов волны для материалов с незначительно различающимися значениями упругих постоян-

Таблица 3

Максимальная концентрация напряжений по Мизесу k для несимметричной волны при различных упругих характеристиках материала и амплитуде волны

$E_{II} \cdot 10^{-11}$	k					
	Сдвиг по оси Oy		Растяжение по оси Ox		Растяжение по оси Oy	
	$H/2$	H	$H/2$	H	$H/2$	H
0,9	1,032	1,035	1,031	1,049	1,061	1,075
0,8	1,075	1,079	1,066	1,132	1,131	1,163
0,7	1,128	1,127	1,102	1,160	1,213	1,267
0,6	1,193	1,191	1,143	1,231	1,309	1,392
0,5	1,282	1,288	1,195	1,311	1,424	1,546
0,4	1,397	1,430	1,252	1,408	1,554	1,729
0,3	1,557	1,647	1,324	1,533	1,721	1,973
0,2	1,805	1,996	1,413	1,684	1,934	2,299

Таблица 4

Максимальная концентрация напряжений по Мизесу k для волны с гребнем при различных упругих характеристиках материала и амплитуде волны

$E_{II} \cdot 10^{-11}$	k					
	Сдвиг по оси Oy		Растяжение по оси Ox		Растяжение по оси Oy	
	$H/2$	H	$H/2$	H	$H/2$	H
0,9	1,018	1,027	1,012	1,017	1,093	1,091
0,8	1,042	1,062	1,028	1,039	1,203	1,198
0,7	1,069	1,103	1,048	1,063	1,342	1,327
0,6	1,105	1,160	1,075	1,097	1,514	1,485
0,5	1,150	1,216	1,108	1,141	1,738	1,695
0,4	1,212	1,309	1,156	1,201	2,042	1,959
0,3	1,299	1,446	1,224	1,298	2,478	2,339
0,2	1,447	1,676	1,356	1,476	3,164	2,901

ных) расстоянии от шва или по макроскопической модели, в которой не учитывается волнообразный характер шва, а полагается, что шов является прямолинейным. Анализ прочности следует проводить для каждого материала с использованием аналога осредненного критерия прочности [9], определяя точку, в которой концентрация напряжений максимальна.

Данные выводы применимы для материалов с мелкозернистой структурой, для которой может быть использовано понятие осредненного критерия прочности [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волнообразование** при косых соударениях: Сб. науч. тр. / Под ред. И. В. Яковлева, Л. Д. Сиротенко, А. М. Ханова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
2. **Crossland B.** Explosive welding of metals and its application. Oxford: Clarendon Press, 1982.
3. **Аннин Б. Д.** Элементы механики композитов / Б. Д. Аннин, Е. В. Карпов. Новосибирск: Ред.-изд. центр Новосиб. гос. ун-та, 2016.
4. **Kolpakov A. G., Andrianov I. V.** Asymptotic decomposition in the problem of joined elastic beams // *Z. angew. Math. Mech.* 2014. Bd 94, N 18. S. 818–836.

5. **Kolpakov A. G., Gaudiello A.** Influence of non degenerated joint on the global and local behavior of joined rods // Intern. J. Engng Sci. 2011. V. 49, N 6. P. 295–309.
6. **Рыбаков В. М.** Сварка и резка металлов. М.: Высш. шк., 1979.
7. **Волкова А. Ю., Гринберг Б. А., Иванов М. А. и др.** Электронно-микроскопическое исследование зоны перемешивания биметаллических соединений алюминий — тантал (сварка взрывом) // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115, № 4. С. 406–418.
8. **ГОСТ 5639-82.** Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Введ. 01.01.83.
9. **Аннин Б. Д.** Расчет и проектирование композиционных материалов и элементов конструкций / Б. Д. Аннин, А. Л. Каламкаров, А. Г. Колпаков, В. З. Партон. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1993.
10. **Работнов Ю. Н.** Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988.
11. **Санчес-Паленсия Э.** Неоднородные среды и теория колебаний. М.: Мир, 1984.
12. **Kolpakov A. A.** Capacity and transport in contrast composite structures: asymptotic analysis and applications / A. A. Kolpakov, A. G. Kolpakov. Boca Raton: CRC Press, 2009.

Поступила в редакцию 28/VII 2017 г.
