

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпинос Д. М., Тучинский Л. И., Вишняков Л. Р. Новые композиционные материалы.— Киев: Вища шк., 1977.
2. Тучинский Л. И. Твердофазное уплотнение армированных металлов.— Киев: Наук. думка, 1980.
3. Композиционные материалы. Справочник/Под ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского.— М.: Машиностроение, 1990.
4. Тан С., Бойл Р., Уайтсайд Дж., Андерсон Р. Нелинейная зависимость между напряжением и деформацией для металлических сеток // РТК.— 1980.— № 6.
5. Вишняков Л. Р., Феодосьева Л. И. Нелинейные деформации металлотрикотажа со структурными элементами ромбовидной формы // Вопросы прочности элементов приборов.— М.: МИП, 1990.
6. Друянов Б. А. Прикладная теория пластичности пористых тел.— М.: Машиностроение, 1989.
7. Хилл Р. Общий метод анализа процессов металлообработки // Механика: Сб. пер. иностр. лит.— 1964.— № 3.
8. Скороход В. В. Реологические основы теории спекания.— Киев: Наук. думка, 1972.
9. Береснев Б. И., Езерский К. И., Трушин Е. В. Физические основы и практическое применение гидроэкструзии.— М.: Наука, 1981.

г. Киев
г. Москва

Поступила 26/VIII 1991 г.,
в окончательном варианте — 22/XI 1991 г.

УДК 539.3

В. Н. Миленин, И. А. Филимоненко, Л. И. Шкутин

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ СО СТАЛЯМИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Методом граничных элементов изучена картина распределения остаточных напряжений в сварных цилиндрических образцах из твердого сплава и стали. Наблюдаемое в экспериментах расширение стали вследствие внутренних структурных превращений задано однородной объемной деформацией. Теоретически и экспериментально доказано, что концентрация осевых растягивающих напряжений на цилиндрической поверхности в зоне сварного соединения служит причиной разрушения твердого сплава. Доказано также, что управление скоростью охлаждения позволяет не только снижать уровень остаточных напряжений и предотвращать разрушение твердого сплава, но и формировать остаточное поле, способное в определенной мере компенсировать эксплуатационные напряжения в сварной детали.

Механизм формирования остаточных напряжений. Твердые сплавы применяются в промышленности для оснащения буровых, режущих, штамповых и других инструментов. Неразъемные соединения создаются посредством сварки, пайки и клеики. Наибольшей прочностью отличаются сварные соединения. Однако наличие остаточных напряжений как неизбежное следствие термического режима сварки снижает прочность сварного соединения и может быть причиной разрушения твердого сплава.

Механизм формирования напряжений в сварных соединениях связан с процессом охлаждения и обусловлен различием коэффициентов термического расширения свариваемых материалов. Снижению уровня остаточных напряжений способствует применение различных компенсационных металлических прокладок, порошковых прослоек, искусственное создание пористости в зоне соединения [1]. Более перспективным, как показывает настоящий анализ, является управление напряженным состоянием за счет эффекта объемного расширения, сопровождающего процесс структурных превращений стали при охлаждении.

© В. И. Миленин, И. А. Филимоненко, Л. И. Шкутин, 1993

Материал	КТР, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, ГПа	Предел упругости, ГПа	Предел прочности, ГПа	
					растяжение	сжатие
Сталь	11,6	0,30	200	0,36	0,61	—
Сплав	5,1	0,27	700	1,50	0,80	4

Основные закономерности формирования напряжений при сварке разнородных материалов можно проследить на простейшей модели одноосной деформации. При охлаждении в свободном состоянии термические деформации стали и твердого сплава равны соответственно $\alpha_1 \Delta T$ и $\alpha_2 \Delta T$ (ΔT — перепад температуры, α_1 и α_2 — коэффициенты термического расширения (КТР) стали и сплава). Если ε_0 — структурная деформация стали, ε_1 и ε_2 — остаточные деформации стали и сплава, то условие жесткого соединения имеет вид

$$\varepsilon_2 + \alpha_2 \Delta T = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \alpha_1 \Delta T.$$

Отсюда определяется остаточная деформация твердого сплава

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_0 - (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T.$$

Как видно, она зависит от структурной деформации стали и скачка свободной термической деформации. При условии $\varepsilon_0 = (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T$ остаточные деформации (и напряжения) в стали и сплаве отсутствуют: структурная деформация погашает скачок термической. Так как $\Delta T < 0$ и $\alpha_1 > \alpha_2 > 0$, то компенсирующее значение структурной деформации положительно (расширение).

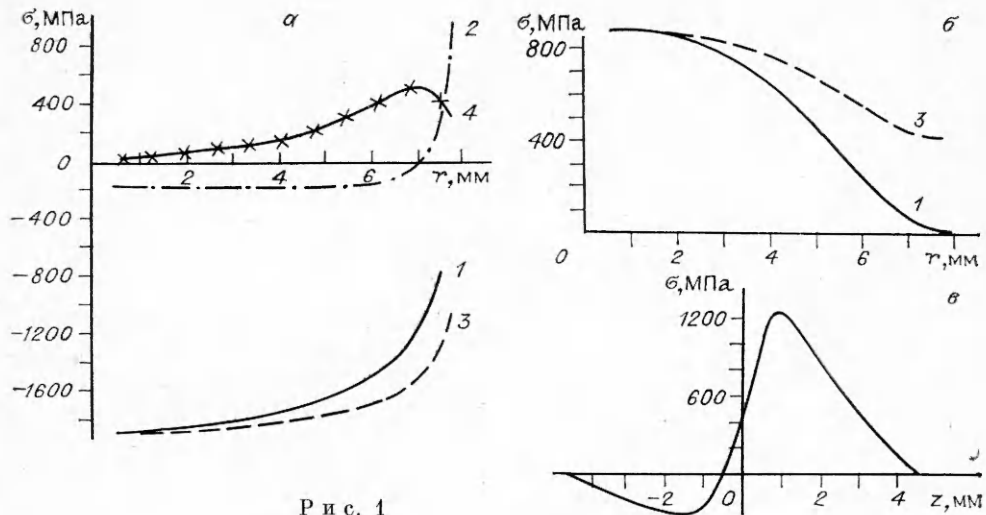
Этот простейший анализ подтверждает возможность снижения уровня остаточных напряжений в твердом сплаве с помощью деформации объемного расширения стали в процессе ее структурных превращений при охлаждении.

Для реальных сварных деталей данная схема выражается сложной кинетико-термомеханической задачей. В данной работе она представлена линейной задачей термоупругости. Объектами исследования являлись биметаллические образцы цилиндрической формы из стали и твердого сплава. Характеристики свариваемых материалов [1] представлены в таблице.

Численному анализу упругих термических напряжений в составных осесимметричных телах конечных размеров посвящены работы [2, 3]. В [2] для расчета составных цилиндрических образцов предложен алгоритм вариационно-разностного метода. Вопрос об управлении уровнем остаточных напряжений не поднимался. В [3] двухслойные диски были подвержены анализу методом конечных элементов. За счет предварительного напряжения одного из слоев достигнуто значительное снижение уровня остаточных напряжений.

В настоящей работе проблема формирования и регулирования остаточных термических напряжений в сварных цилиндрических образцах решается методом граничных элементов, который, по-видимому, в наибольшей степени соответствует специфике задачи. Осуществлена экспериментальная проверка теоретических результатов.

Математическая постановка и численный анализ задачи. В цилиндрической системе координат рассматривается кусочно-однородное тело в форме кругового цилиндра радиуса R . Плоскость $z = 0$ отделяет две его части высотой Z_1 и Z_2 из разных материалов. Предполагается, что материал каждой цилиндрической части однороден и изотропен, их соединение жесткое, температура не зависит от координат, коэффициенты термического расширения α_1 и α_2 не зависят от температуры.



Р и с. 1

Деформация кусочно-однородного цилиндра при охлаждении от температуры T_0 до T изучается в рамках линейной осесимметричной задачи термоупругости. Вектор перемещений определяется двумя компонентами: радиальной u и осевой v , тензор деформаций — четырьмя компонентами:

$$\varepsilon_1 = \partial u / \partial r, \quad \varepsilon_2 = \partial v / \partial z, \quad \varepsilon_3 = u / r, \quad \varepsilon_4 = \partial v / \partial r + \partial u / \partial z,$$

тензор напряжений — четырьмя компонентами:

$$\sigma_n = 2G(\gamma_n + (1 - 2\nu)^{-1}\nu\gamma), \quad \sigma_4 = G\gamma_4.$$

Здесь $\gamma_n = \varepsilon_n - \varepsilon_0 + \alpha(T_0 - T)$; $\gamma_4 = \varepsilon_4$; $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$; G — модуль сдвига; ν — коэффициент Пуассона; ε_0 — структурная деформация объемного расширения, строчный индекс принимает значения 1, 2 и 3.

Решение осесимметричной задачи термоупругости было выполнено прямым методом граничных элементов [4]. Граница области разбивалась на прямолинейные элементы с регулярным сгущением сетки вблизи угловых точек. Заданные и неизвестные граничные функции принимались постоянными на элементе. Вычисление интегралов производилось по формуле Гаусса с дроблением граничного элемента на подэлементы в окрестности сингулярной точки.

Предложенная постановка задачи и ее численный анализ методом граничных элементов позволили изучить распределение остаточных напряжений в остывших сварных образцах из стали и твердого сплава в зависимости от структурных деформаций стали. Результаты численного анализа представлены на рис. 1 и 2. Все данные получены при перепаде температуры $T_0 - T = 100$ К. Линии 1—4 — это графики радиального σ_{rr} , осевого σ_{zz} , окружного $\sigma_{\varphi\varphi}$ и касательных $\sigma_{zr} = \sigma_{rz}$ напряжений.

Рис. 1 изображает распределение напряжений в сварном образце из стали и твердого сплава с размерами $R = 8$ мм, $Z_2 = Z_1 = 5$ мм при охлаждении его на 100 К без учета структурной деформации стали; а — распределение напряжений в твердом сплаве по радиусу контактного сечения $z = 0$. Радиальное и окружное напряжения сжимающие и монотонно убывающие по абсолютной величине в направлении от оси к цилиндрической поверхности. Их значения на оси совпадают друг с другом. Осевое напряжение, будучи сжимающим и малым внутри цилиндра, становится растягивающим и большим у его поверхности. Касательное напряжение растет от центра к периферии, но на самой поверхности оно равно нулю, поэтому наблюдается резкий его спад у цилиндрической поверхности.

Рис. 1, б демонстрирует распределение радиальных и окружных напряжений на свободной торцевой поверхности $z = Z_2$ твердого сплава. Будучи растягивающими, они убывают от центра к периферии, причем

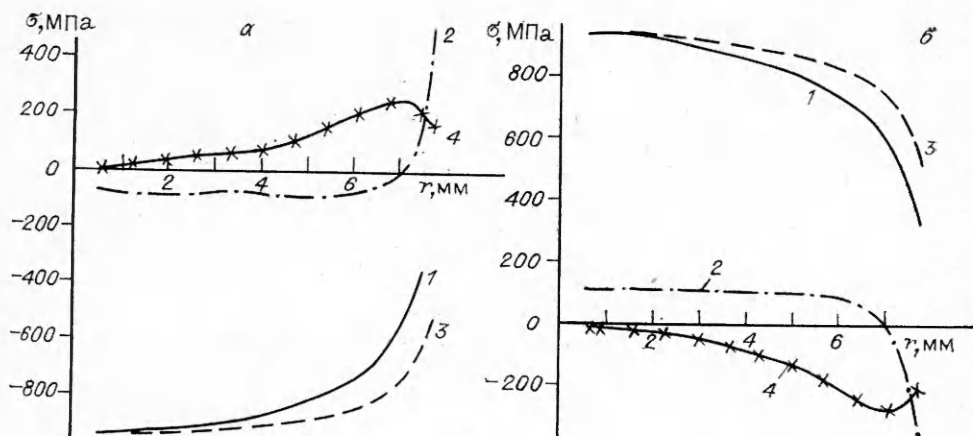
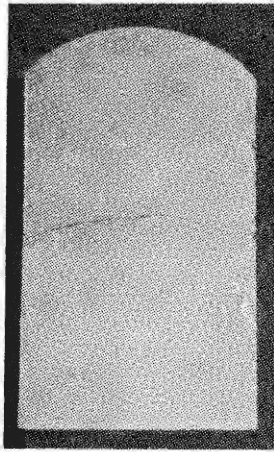


Рис. 2

их значения в центре достойны внимания. Осевые и касательные напряжения на этой поверхности отсутствуют. На рис. 1, *в* приведено распределение осевых напряжений по цилиндрической поверхности $r = R$ образца. Как видно, осевые растягивающие напряжения в сплаве достигают наибольшего значения не в точке контакта со сталью ($z = 0$), а вблизи нее. В окрестности этой точки сталь также подвержена значительным растягивающим напряжениям.

Влияние структурной деформации стали на напряженное состояние сварного образца показано на рис. 2. Структурная деформация ϵ_0 задавалась в долях скачка $(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T$ свободной термической деформации. Кроме значения $\epsilon_0 = (\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T$, которому отвечают практически нулевые напряжения, рассмотрены два значения ϵ_0 , составляющие 50 и 150 % от скачка, им отвечают расчетные данные, приведенные на рис. 2. Его графики имеют тот же смысл, что и на рис. 1, *а*. В сравнении с данными рис. 1, *а* 50%-я структурная деформация стали в 2 раза понижает уровень остаточных напряжений в твердом сплаве (рис. 2, *а*). При 150%-й деформации наблюдается инверсия напряженного состояния: растягивающие напряжения становятся сжимающими, сжимающие — растягивающими (рис. 2, *б*).

Экспериментальный анализ остаточных напряжений. Рассмотренные при расчетах значения структурной деформации стали обеспечивались в эксперименте применением соответствующих режимов охлаждения. Перепад температуры составлял 700—800 К. Скорости охлаждения выбирались на основе анализа анизотермических диаграмм аустенитного распада и составляли интервал от 5 до 120 К/с, что охватывало всю область структурных превращений в стали. При исследовании структуры и фазового состояния использовались общепринятые методы металлографического анализа. Остаточные напряжения определялись рентгенографическим методом на торцевой плоскости твердого сплава. В ходе экспериментов установлено, что при скоростях охлаждения 5—10 К/с распад аустенита сопровождается образованием перлитно-сорбитных структур. Структурные деформации в стали при таком виде превращения недостаточны для компенсации термических деформаций, вызванных разностью коэффициентов термического расширения свариваемых материалов. Возникающие на торцевой плоскости твердого сплава растягивающие напряжения составляли 300—400 МПа. В интервале скоростей охлаждения 70—80 К/с формируются бейнитно-мартенситные структуры. Измеренные значения напряжений колеблются в пределах от —50 до 80 МПа. С увеличением скорости охлаждения до 100 К/с и выше в стали преобладали мартенситные структуры. Напряжения, измеренные на поверхности сплава, были в данном случае сжимающими. Их значения находились в пределах 100—150 МПа. Изменение знака напряжений показывает, что структурные деформации превышают термические.



Р и с. 3

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов подтверждает их качественное согласование. Количественное отличие связано с возможной неоднородностью структур по сечениям образца из-за неодинаковой прокаливаемости поверхностных и центральных участков стального цилиндра, с пластическими деформациями стали и релаксацией напряжений. В самом деле, расчеты показывают, что при заданном перепаде температуры напряжения в стали превышают предел упругости, и, следовательно, неизбежно появление пластических зон. Наличие пор и дефектов в структуре твердого сплава способствует релаксации напряжений.

Когда термические напряжения в твердом сплаве приближаются к пределу прочности, развитие микротрещин приводит к разрушению. Типичная картина разрушения твердого сплава после сварки со сталью при низких скоростях охлаждения показана на рис. 3. Зарождение микротрещин и разрушение сплава начинается на цилиндрической поверхности в зоне сварного соединения со сталью. Согласно расчету, именно здесь происходит концентрация осевых растягивающих напряжений. Дальнейшему развитию разрушения способствуют также касательные напряжения, сосредоточенные у цилиндрической поверхности образца. Радиальные и окружные напряжения, будучи сжимающими в зоне соединения, не могут быть причиной разрушения твердого сплава, поскольку его прочность при сжатии несравненно выше, чем при растяжении. По этой же причине интенсивность напряжений, лишенная информации об их характере, не может служить критерием прочности твердого сплава. Расчеты и эксперименты убеждают, что таким критерием является осевое растягивающее напряжение на цилиндрической поверхности в зоне сварного соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключко Н. А. Основы технологии пайки и термообработки твердосплавного инструмента.— М.: Металлургия, 1981.
2. Белейчева Т. Г., Зилинг К. К. Термоупругая осесимметричная задача для двухслойного цилиндра // ПМТФ.— 1978.— № 1.
3. Цыбенко А. С., Майстренко А. Л., Кулаковский В. Н. и др. Анализ технологических напряжений в двухслойных дисках SiC—Si // Пробл. прочности.— 1982.— № 11.
4. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов.— М.: Мир, 1987.

г. Красноярск

Поступила 16/XII 1991 г.

УДК 539.2 : 539.172.3 : 621.78

Я. С. Семенов, М. Н. Сивцев, А. А. Аргунова

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА НА ХЛАДОСТОЙКОСТЬ ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ

Известно, что электроперенос позволяет создавать атомные потоки и концентрационные сдвиги в сплавах и, таким образом, изучать подвижность и коэффициенты диффузии атомов [1, 2]. Электроперенос представляет интерес и с технологической точки зрения. Было доказано, что

© Я. С. Семенов, М. Н. Сивцев, А. А. Аргунова, 1993