



ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА ОСТАТОЧНУЮ НАПРЯЖЕННОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ

В. А. ШОНИН, канд. техн. наук, **О. И. ГУЦА**, д-р техн. наук, **В. С. МАШИН**, **В. С. КОВАЛЬЧУК**, кандидаты техн. наук, **А. З. КУЗЬМЕНКО**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты оценки остаточных напряжений в стыковых сварных соединениях алюминиевого сплава АД33 (6061) толщиной 6 мм на образцах различной ширины (70...600 мм), полученных способами сварки ТИГ и МИГ. С помощью экспериментов показано влияние продольных и поперечных растягивающих остаточных напряжений на прочность и долговечность сварных образцов с поперечным швом при осевой нагрузке.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, стыковые сварные соединения, сопротивление усталости, прочность, долговечность, сварочные остаточные напряжения, концентрация напряжений, размеры образца

Для установления расчетных сопротивлений усталости сварных соединений преимущественно используют данные испытаний на осевую циклическую нагрузку однотипных крупногабаритных или лабораторных образцов, в которых максимально учтены факторы, свойственные сварным конструкциям [1–9]. В ряде случаев применяют также образцы малой ширины (сваренные по отдельности или вырезанные из большой заготовки), которые воспроизводят в общем виде форму и структурное состояние соединений, характерных для используемых способов и режимов сварки. Однако до настоящего времени при выборе размеров образцов для усталостных испытаний не существует определенной ясности в отношении учета остаточной напряженности.

Анализ проблемы. Наличие остаточных напряжений в металлоконструкциях является следствием [10–16] неравномерного термического воздействия в условиях сварки плавлением. Остаточные напряжения образуются в результате продольного и поперечного укорочения металла при его охлаждении после пластического теплового сжатия в зоне термического влияния (ЗТВ) и усадке шва. Уровень продольных и поперечных остаточных напряжений возрастает с уменьшением размеров активного температурного поля относительно длины, ширины и толщины свариваемых пластин [15, 16]. Поэтому характер распределения сварочных остаточных напряжений зависит не только от размеров соединяемых деталей, но и от способа сварки. Причем на сопротивление усталости оказывают влияние поверхностные остаточные напряжения в зоне геометрического концентратора напряжений, характер распределения которых определяется продольной и поперечной составляющими.

Применительно к сварным соединениям алюминиевых сплавов ранее [5, 17–19] экспериментально установлено, что в сочетании с геометрическим концентратором напряжений наибольшее

повреждающее влияние оказывают остаточные напряжения того направления, которое совпадает с напряжениями внешнего нагружения. Причем долговечность поперечных соединений с необработанными швами заметно снижается при увеличении уровня поперечных по отношению к шву растягивающих остаточных напряжений. Их действие подобно статической составляющей циклических напряжений, которое обуславливает увеличение эффективного коэффициента асимметрии цикла в зоне концентратора напряжений [3].

В сварных образцах большой ширины со сплошными швами высокие поперечные растягивающие остаточные напряжения (в средней части образца) образуются при увеличенном тепловложении и малой скорости сварки (например, ручная сварка ТИГ). Они уравновешены в пределах всей ширины пластины в продольном сечении шва. Уровень этих поперечных растягивающих остаточных напряжений в ЗТВ достигает максимального значения при размере пластины более 500×500 мм [10, 13, 14]. Подобные условия образования высоких поперечных растягивающих остаточных напряжений характерны и для случая выполнения коротких швов, у которых длина значительно меньше ширины пластины (например, приваривание деталей небольших размеров к основному элементу).

Поперечные растягивающие остаточные напряжения высокого уровня в поверхностных слоях металла ЗТВ образуются также и при выполнении многослойных швов (более четырех проходов) в толстостенных элементах конструкций [5, 11]. Однако в этом случае остаточные напряжения уравновешены в пределах толщины металла и мало зависят от ширины и длины свариваемых пластин.

При всех вариантах сварки плавлением продольные растягивающие остаточные напряжения, уравновешенные в поперечном сечении соединения, имеют более высокие значения, чем поперечные растягивающие остаточные напряжения. Они не снижают долговечность соединений с неснятой выпуклостью шва при циклической нагрузке вдоль шва, вследствие минимальной концентрации напряжений в этом направлении. Повреждающее вли-

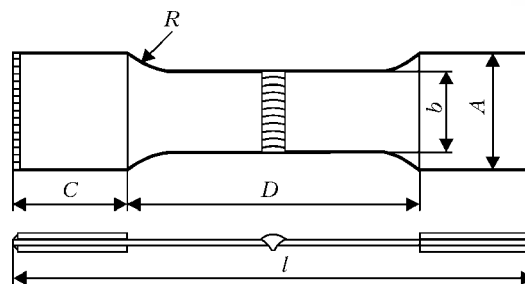


яние продольных растягивающих остаточных напряжений максимально в соединениях с пересекающимися швами [1], когда продольный шов выполнен последним, что обуславливает наведение растягивающих остаточных напряжений поперек предыдущего шва. Такие случаи не типичны для сварных конструкций. При действии внешних напряжений поперек шва роль продольной составляющей растягивающих остаточных напряжений выяснена не достаточно.

Неполнота данных о характере распределения поперечных и продольных остаточных напряжений в испытуемых на усталость образцах и реальных конструкциях, а также нечеткая интерпретация экспериментальных данных об их влиянии на долговечность нашли отражение в нормах расчета прочности стальных конструкций [7, 9], в которых не конкретизируется направленность продольной и поперечной составляющих растягивающих остаточных напряжений по отношению к напряжениям внешнего нагружения. Такой упрощенный подход, основанный на максимальном повреждающем влиянии растягивающих остаточных напряжений, предлагается использовать и при составлении норм расчета алюминиевых конструкций [20]. При этом не учитываются возможности совершенствования проектирования сварных конструкций путем создания в них более благоприятного сочетания остаточных напряжений с напряжениями внешней нагрузки [15]. Применение высокопроизводительных способов сварки напроход, при которых имеет место значительное сужение ЗТВ, является основным условием существенного снижения поперечных растягивающих остаточных напряжений в соединениях алюминиевых конструкций [6].

В связи с этим возникла необходимость оценки влияния реальных остаточных напряжений, вызванных изменением размеров образца сварного соединения и способа сварки, при условии, если продольная составляющая значительно превышает поперечную составляющую остаточного напряжения. Это необходимо для установления достаточных для усталостных испытаний размеров образцов сварных соединений алюминиевых сплавов, выполняемых высокопроизводительными способами сварки плавлением, и получения ответа на вопрос об обоснованности применения дополнительных мер по наведению поперечных растягивающих остаточных напряжений в сварном соединении.

Целью настоящей работы являлась оценка влияния размеров сварного образца на сопротивление



Размеры, мм					
<i>b</i>	<i>A</i>	<i>l</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>R</i>
70	90	600	100	300	60
200	250	900	200	500	60
500	550	900	200	650	60

Рис. 1. Сварные образцы для усталостных испытаний

усталости стыковых сварных соединений алюминиевых сплавов во взаимосвязи с поперечной и продольной составляющей растягивающих остаточных напряжений в случае применения высокопроизводительных способов дуговой сварки ТИГ и МИГ.

Материалы и методы исследований. Исследования проводили на образцах стыковых соединений сплава АДЗЗТ1 (6061 Т6) толщиной 6 мм. Общий вид образца для усталостных испытаний и его размеры представлены на рис. 1. Заготовки образцов сваривали отдельно поперек направления проката без скоса кромок за один проход в нижнем положении. Образцы шириной 200 и 500 мм сваривали по одной заготовке, а шириной 70 мм – в одном пакете из 3...6 заготовок с выводом начального и конечного участков шва на технологические планки. При этом применяли два способа автоматизированной сварки – плавящимся электродом (МИГ) в смеси инертных газов (Ar + He) и неплавящимся (ТИГ) в аргоне. Соединения выполняли с использованием сварочной проволоки диаметром 1,6 мм из сплавов СвАМг5 и СвАК5. Сварку МИГ осуществляли углом вперед с наклоном электрода под углом 80° к оси шва. Подготовка кромок под сварку отвечала требованиям стандарта NFA 87010. Для формирования выпуклости с обратной стороны шва использовали стальную подкладку (в соответствии с рекомендациями стандарта NFA 89220). Качество швов было не ниже второго класса. Для сварки МИГ использовали источник питания постоянного тока ВДУ-506 (номинальный сварочный ток 500 А), преобразователь импульсного тока ОИ-122 и сварочный аппарат А-1431. Сварку ТИГ осуществляли от ис-

Таблица 1. Режимы сварки

Способ сварки	Тип сварочной проволоки	Сварочный ток $I_{св}$, А	Напряжение на дуге U_d , В	Скорость подачи сварочной проволоки $v_{пр}$, м/ч	Скорость сварки $v_{св}$, м/ч	Расход газа, л/мин	
						аргон	гелий
МИГ	СвАМг5	300...320	24...25	350...360	38	20	20
	СвАК5	300...320	24...25	350...360	38	20	20
ТИГ	СвАМг5	430...440	10...11	85	8	20	—
	СвАК5	430...440	10...11	85	8	20	—

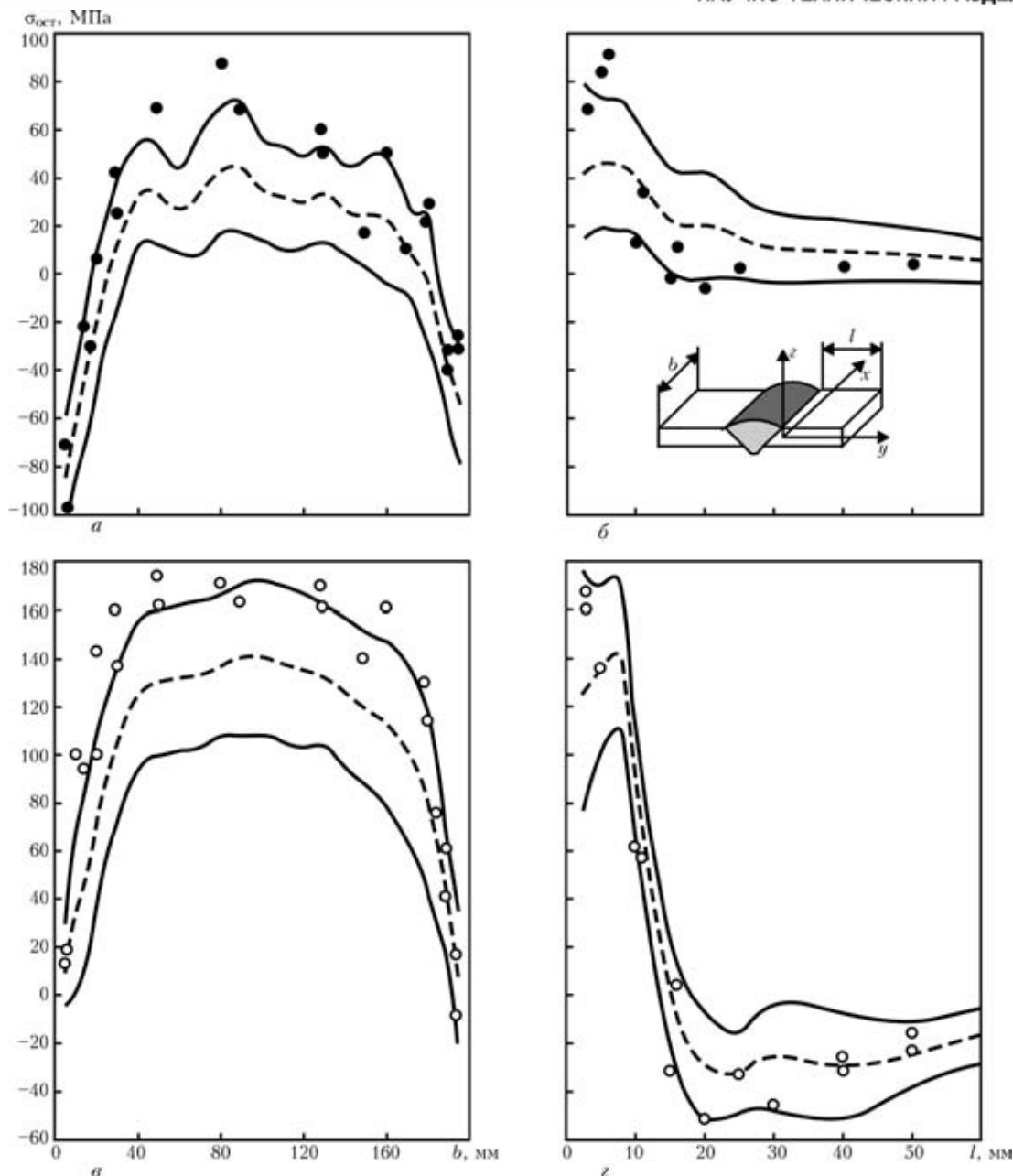


Рис. 2. Поперечные $\sigma_{ост}^y$ (а, б) и продольные $\sigma_{ост}^x$ (в, г) остаточные напряжения в образцах шириной 200 мм, полученных сваркой МИГ с применением проволок SwAМг5 (кривые) и SwAK5 (точки): а, в — сечение вдоль ЗТВ; б, г — сечение поперек шва вдоль оси образца; штриховые кривые — средние значения двенадцати измерений; сплошные — границы разброса измеренных данных

точника питания И-126 на сварочном автомате АС-ТВ-2М вольфрамовым электродом диаметром 6 мм. Режимы сварки приведены в табл. 1.

Для определения остаточных продольных $\sigma_{ост}^x$ и поперечных $\sigma_{ост}^y$ напряжений в образцах средней толщины использован неразрушающий акустический метод измерений, основанный на изменении скорости распространения ультразвука в металле в зависимости от его нагруженного состояния [14, 21]. Измерения осуществляли с помощью портативного прибора, разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона. Погрешность измеряемого уровня напряжений не превышала 10 % предела текучести основного металла. База измерения продольных и поперечных остаточных напряжений определялась размерами датчика (7×7 мм) — акустического преобразова-

теля квадратной формы. Измеряли значения остаточных напряжений в сечениях, параллельных оси шва, проходящих по ЗТВ, и перпендикулярно шву в центральной части образца. Чтобы максимально приблизить датчик к зоне сплавления, его закрепляли на поверхности образца со стороны корня шва. В одном сечении образца в зависимости от его ширины и ожидаемого градиента напряжений измерения выполняли в 7...15 точках. Остаточные напряжения измеряли в сварных заготовках и исходных образцах до испытаний; их результаты представлены в обобщенном виде на рис. 2–5. Для определения остаточных напряжений в непосредственной близости к зоне сплавления (на расстоянии 2 мм от границы шва) применяли также тензометрический метод измерения датчиками с базой 5 мм. Остаточные напряжения

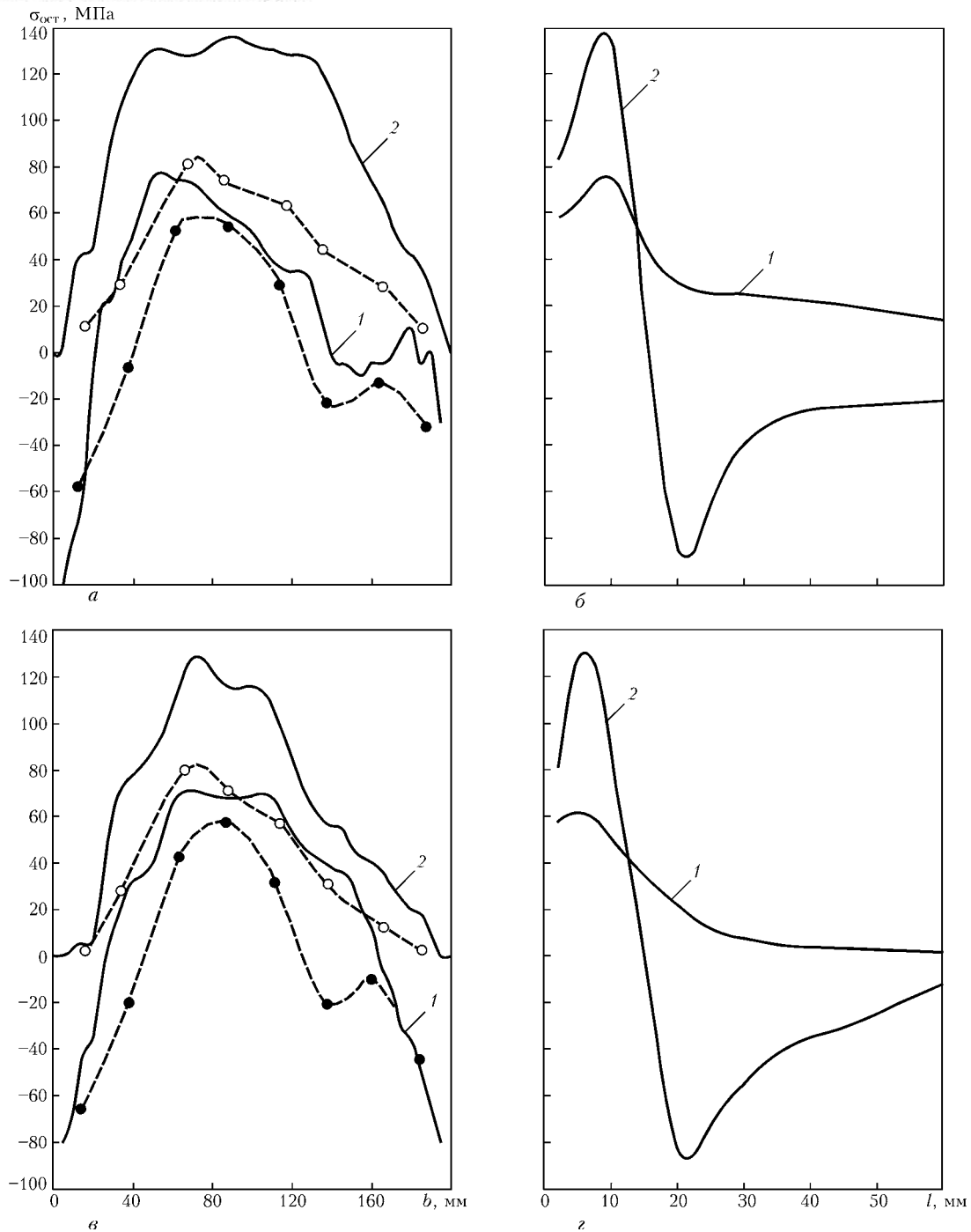


Рис. 3. Поперечные (1, ●) и продольные (2, ○) остаточные напряжения в образцах шириной 200 мм, полученных сваркой ТИГ с применением проволок СвАМг5 (а, б) и СвАК5 (в, г): а, в — сечение вдоль ЗТВ; б, г — сечение поперек шва вдоль оси образца; 1, 2 — средние значения трех измерений акустическим методом; штриховые кривые и точки — данные тензометрических измерений

в направлении толщины металла (рис. 2) не рассматривали, поскольку на поверхности $\sigma_{ост}^z = 0$.

Коэффициент концентрации напряжений в соединениях, обусловленной геометрией профиля шва, рассчитывали по известным зависимостям с учетом рекомендаций, представленных в работе [22]. Для этого использовали статистические данные измерений основных параметров профиля шва — радиуса ρ и угла θ галтельной поверхности на границе шва; высоты h и ширины b шва. Измерения этих параметров выполняли в заготовках и образцах, полученных различными способами и на различных режимах сварки: способом прямого

измерения (профилометрированием с ценой деления измеряющих устройств 0,01 мм) и способом репликации с помощью слепков из пластмассы и измерения инструментальным микроскопом при 10-кратном увеличении профиля рассеченного слепка. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Усталостные испытания однотипных сварных образцов стыковых соединений проводили на осевое циклическое нагружение при знакопостоянном коэффициенте асимметрии цикла $R_\sigma = 0,1$ с частотой нагружения 4...7 Гц. Каждая серия испытаний включала не менее восьми однотипных образцов. Учитывая большой диапазон их ширины



Таблица 2. Параметры вышуклости шва и расчетный коэффициент α_σ концентрации напряжений в образцах

Способ сварки	Тип сварочной проволоки	Страна шва									
		лицевая					корневая				
		ρ , мм	θ , град	b , мм	h , мм	α_σ	ρ , мм	θ , град	b , мм	h , мм	α_σ
ТИГ	СвАМГ5	$\frac{1,13}{0,22}$	$\frac{17,6}{2,2}$	$\frac{16,9}{2,60}$	$\frac{1,67}{0,18}$	$\frac{1,50}{0,06}$	$\frac{0,76}{0,30}$	$\frac{35,0}{7,4}$	$\frac{7,90}{0,36}$	$\frac{1,38}{0,16}$	$\frac{1,76}{0,16}$
	СвАК5	$\frac{1,32}{0,91}$	$\frac{26,0}{6,4}$	$\frac{21,20}{6,45}$	$\frac{1,39}{0,19}$	$\frac{1,72}{0,39}$	$\frac{0,72}{0,24}$	$\frac{36,9}{5,5}$	$\frac{7,80}{0,52}$	$\frac{1,38}{0,13}$	$\frac{1,79}{0,14}$
МИГ	СвАМГ5	$\frac{1,10}{0,32}$	$\frac{18,9}{3,2}$	$\frac{17,40}{0,46}$	$\frac{1,73}{0,27}$	$\frac{1,55}{0,09}$	$\frac{0,38}{0,21}$	$\frac{51,3}{9,7}$	$\frac{4,70}{0,65}$	$\frac{1,77}{0,31}$	$\frac{2,43}{0,67}$
	СвАК5	$\frac{0,73}{0,65}$	$\frac{24,4}{6,9}$	$\frac{17,10}{0,88}$	$\frac{1,48}{0,25}$	$\frac{1,91}{0,34}$	$\frac{0,66}{0,53}$	$\frac{46,7}{7,3}$	$\frac{4,95}{1,90}$	$\frac{1,66}{0,31}$	$\frac{2,00}{0,40}$

Примечание. В числителе приведены средние значения; в знаменателе — стандартное отклонение.

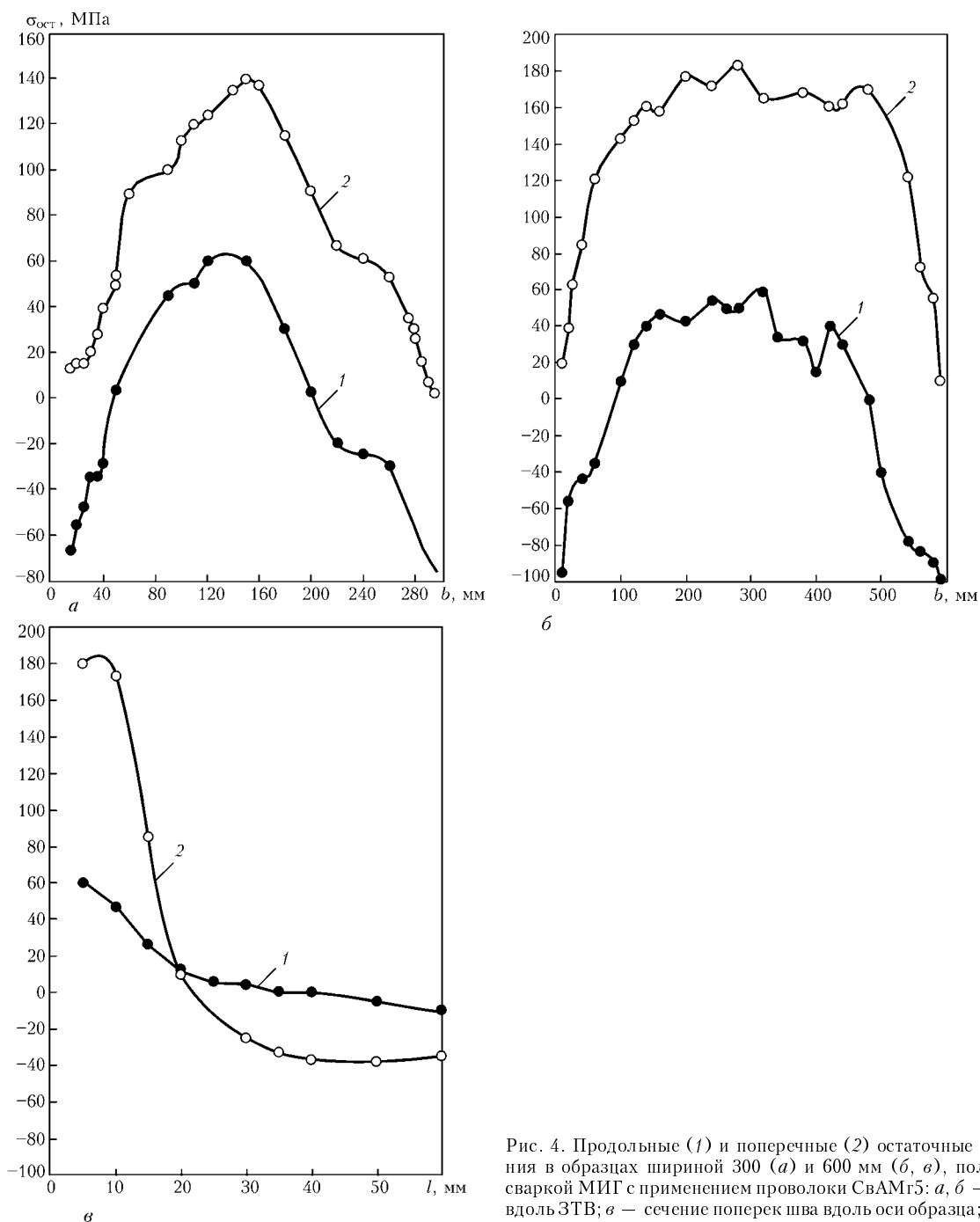


Рис. 4. Продольные (1) и поперечные (2) остаточные напряжения в образцах шириной 300 (а) и 600 мм (б, в), полученных сваркой МИГ с применением проволоки СвАМГ5: а, б — сечение вдоль ЗТВ; в — сечение поперек шва вдоль оси образца; точки — средние значения трех измерений

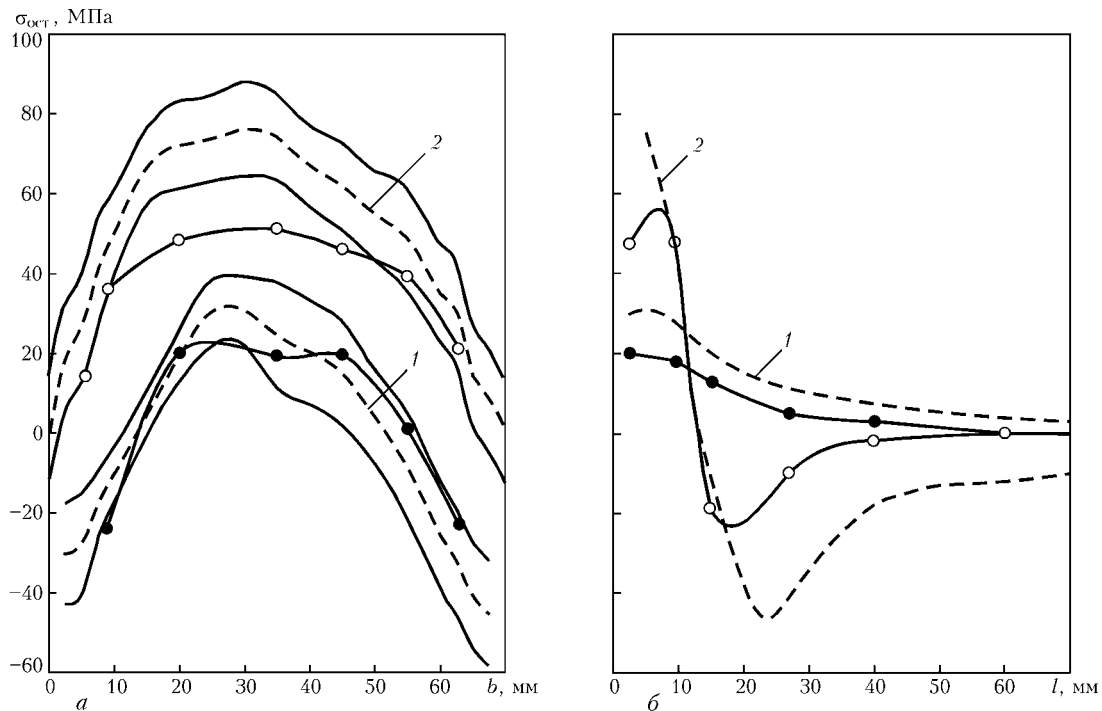


Рис. 5. Поперечные (1, ●) и продольные (2, ○) остаточные напряжения в образцах шириной 70 мм, полученных сваркой МИГ (кривые) и ТИГ (кривые с точками) с применением проволоки SvAMg5: а – сечение вдоль ЗТВ; б – сечение поперек шва вдоль оси образца; штриховые кривые – средние значения шести измерений; сплошные – границы разброса измеренных данных; точки – результаты единичных измерений

(70... 500 мм) для испытаний использованы электрогидравлические машины УРС-20 и Шенк-100 (РС-1,0), имеющие силоизмерительное устройство с погрешностью измерения нагрузки $\pm 1\%$. Для испытаний образцов значительной ширины применяли гидравлическую машину пульсаторного типа ЦДМ-200. Режим циклического нагружения этой машины устанавливали по напряжениям в образце с помощью тензометрических датчиков с базой 10 мм. Датчики приклеивали симметрично в четырех точках на поверхности рабочей зоны образца в 10 мм от границы шва. Для уменьшения неравномерного распределения от сосредоточенного приложения нагрузки в захватах испытательных машин применяли двухсторонние накладки, которые вырезали из основного металла в размеры захватной части образца. Их приваривали угловыми поперечными швами к торцам образца. Результаты усталостных испытаний представляли значениями размаха номинальных напряжений $2\sigma_a$ и долговечностью до полного разрушения сварного соединения.

Подготовили также серию сварных образцов шириной 200 мм с искусственно наведенными высокими поперечными растягивающими остаточными напряжениями в ЗТВ, расположенной в центральной части сварного соединения. Для наведения в ЗТВ поперечных растягивающих напряжений, сопоставимых по уровню с продольными растягивающими напряжениями, применен способ точечного нагрева, который осуществляли газовой горелкой до температуры около 250 °С на некотором удалении от шва при дополнительном отводе тепла из окрестности зоны нагрева с помощью медной кольцевой накладки, охлаждаемой проточ-

ной водой. Такая обработка не вызвала общей деформации образца, а поперечные растягивающие остаточные напряжения при этом возросли от 45 до 130 МПа.

Основные механические свойства на однократное статическое растяжение основного металла и сварных соединений, выполненных различными способами сварки, определяли на образцах стандартной ширины ($b = 15$ мм). Испытывали также на растяжение образцы большой ширины ($b = 70$ и 200 мм). Использованы универсальные машины УМЭ-10, УЭ-50 и Шенк-100 (РС-1,0). При оценке предела текучести для образцов шириной $b = 70$ и 200 мм использовали экстензометр с базой $L_{E_0} = 100$ мм, а для узких ($b = 15$ мм) – $L_{E_0} = 25$ мм. При оценке стандартного относительного удлинения δ_5 для широких образцов расчетная длина измерения ($L_0 = 5,65\sqrt{bt}$) значительно превышала ширину ЗТВ металла. Определяли также относительное удлинение $\delta_{50\text{ мм}}$ на базе $L_0 = 50$ мм, которое соответствовало максимальной ширине ЗТВ. Средние значения, полученные при испытании трех и более образцов, представлены в табл. 3.

Результаты исследований. Механические свойства сварного соединения. Испытания образцов сварного соединения на кратковременное растяжение показали следующее: предел прочности σ_B на 30 %, предел текучести $\sigma_{0,2}$ на 50 %, относительное удлинение δ_5 более чем в 2 раза, $\delta_{50\text{ мм}}$ на 21 % ниже соответствующих характеристик основного металла (см. табл. 3). Такое снижение механических свойств вызвано термическим разупрочнением основного металла вблизи границ шва. При этом сварные образцы разрушались на



Таблица 3. Механические свойства, полученные при растяжении образцов сварного соединения

Способ сварки	Тип сварочной проволоки	Вид образца	b , мм	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\delta_{50\text{ мм}}$, %	δ_5 , %	
ТИГ	СвАМг5	Без выпуклостей	15	185	109*	7,6	6,9	
		С выпуклостями	70	199	137	9,2	4,0	
	СвАК5	Без выпуклостей	15	186	117*	8,0	7,3	
		С выпуклостями	15	178	119*	8,1	7,4	
		»»	70	202	141	8,3	3,6	
МИГ	СвАМг5	Без выпуклостей	15	203	102*	8,5	7,7	
		»»	70	219	137	10,7	4,65	
		С выпуклостями	70	222	155	9,2	4,0	
		»»	200	219	161	7,8	2,0	
	СвАК5	Без выпуклостей	15	200	117*	8,1	7,4	
		»»	70	209	139	9,9	4,3	
		С выпуклостями	70	212	144	8,3	3,6	
	Без сварки		Основной металл	20	291	261*	—	13,0

Примечание. Значения $\sigma_{0,2}$ со звездочкой определяли экстензометром с базой 25, остальные — с базой 100 мм.

расстоянии 6...8 мм от границы шва. Характер разрушения почти не зависит от применяемого способа сварки и типа сварочной проволоки. Основной металл образцов за пределами ЗТВ при испытаниях до разрушения практически не накапливал остаточных деформаций удлинения.

Увеличение ширины сварного образца от 70 до 200 мм приводит к возрастанию значения $\sigma_{0,2}$ на 5 % и снижению $\delta_{50\text{ мм}}$ на 15 %. Подобное влияние оказывает выпуклость шва (по сравнению с образцами без выпуклости) при ее срезании в узких и широких образцах. Способ сварки практически не влияет на σ_b , $\sigma_{0,2}$ и $\delta_{50\text{ мм}}$ сварных соединений. Однако в случае снятия выпуклости шва наблюдается заметное увеличение условного предела текучести образцов, сваренных проволокой СвАК5 вместо СвАМг5.

Увеличение условного предела текучести и снижение относительного удлинения в образцах большой ширины, возможно, связано с влиянием продольной составляющей растягивающих остаточных напряжений в сварном соединении, которые направлены перпендикулярно напряжениям внешнего нагружения и способствовали увеличению жесткости напряженного состояния в ЗТВ.

Остаточные напряжения. В образцах большой ширины ($b = 200$ мм), полученных сваркой МИГ с применением проволоки СвАК5, остаточные напряжения имеют высокие значения в продольном направлении — $\sigma_{\text{ост}}^x = 140$ МПа и низкие в поперечном направлении — $\sigma_{\text{ост}}^y = 45$ МПа (см. рис. 2). Как видно из рисунка, при ширине, рекомендуемой [7] для сварных стальных образцов, поперечные растягивающие остаточные напряжения в 3 раза ниже, чем продольные. На рис. 2 представлены средние значения результатов определения остаточных напряжений акустическим методом в 12 однотипных образцах для сечений, проходящих вдоль ЗТВ на расстоянии 7,5 мм от границы шва, и поперек сварного шва вдоль оси образца. В продольных ко шву сечениях отсчет расстояния

от края образца по ширине совпадал с направлением сварки, а в поперечных ко шву сечениях он начинался от границы шва, отвечающей зоне сплавления. При неизменном режиме сварки МИГ и применении проволоки СвАК5 растягивающие поперечные ($\sigma_{\text{ост}}^y$) и продольные ($\sigma_{\text{ост}}^x$) остаточные напряжения в ЗТВ, расположенной в центральной части образца, заметно выше средних значений остаточных напряжений в образцах, полученных сваркой МИГ проволокой СвАМг5. При этом данные одиночных измерений остаточных напряжений в образцах, выполненных проволокой СвАК5, находятся на верхней границе, отвечающей одному стандартному отклонению результатов измерений остаточных напряжений в образцах, сваренных проволокой СвАМг5.

В продольном ко шву сечении (см. рис. 2, *в*) продольные растягивающие остаточные напряжения одного знака имеют максимальные значения в центре образца и нулевые по его краям. Подобный характер распределения поперечных растягивающих остаточных напряжений наблюдается в перпендикулярном ко шву сечении с максимальным их значением вблизи шва и снижением до нулевого значения при удалении от шва более чем на 60 мм (см. рис. 2, *б*). Поперечные растягивающие остаточные напряжения в продольном ко шву сечении (см. рис. 2, *а*) так же, как и продольные остаточные напряжения в поперечном ко шву сечении (см. рис. 2, *з*), уравновешены сжимающими напряжениями по краям образца (в продольном сечении) и примыкающим к ЗТВ основным металлом (в поперечном сечении). Однако характер распределения (эпюра) поперечных растягивающих остаточных напряжений в продольном ко шву сечении в отличие от классической эпюры в виде правильной параболы с экстремумом в центре образца имеет более сложный вид с несколькими экстремумами по всей ширине образца. Чередование максимума и минимума напряжения существенно сказывается на снижении максимального растягива-



ющего напряжения и увеличении разброса результатов измерений (см. рис. 2, а).

Более одного экстремума поперечных растягивающих напряжений наблюдается также и на образцах шириной 200 мм (см. рис. 3, а, в), полученных сваркой ТИГ присадочными проволоками СВАМг5 и СВАК5. Первый пик образуется в начале сварного шва на расстоянии 80 мм от края образца и имеет более высокое, чем при сварке МИГ, среднее растягивающее остаточное напряжение ($\sigma_{\text{ост}}^y = 80$ МПа). Второй пик низкого уровня наблюдается на расстоянии 160 мм от края образца.

При термическом цикле сварки ТИГ образцов шириной 200 мм образуется вдоль шва такая же зона с растягивающими остаточными напряжениями, как и в случае сварки МИГ; она составляет 15 мм с лицевой стороны шва. Однако более заметно проявляется спад максимальных продольных растягивающих напряжений $\sigma_{\text{ост}}^x$ особенно в непосредственной близости к границе шва (см. рис. 3, б, г). Применение тензометрического метода измерения остаточных напряжений на расстоянии 2 мм от границы шва показало, что продольные и поперечные остаточные напряжения и характер их распределения не зависят от типа применяемой присадочной проволоки, при этом значения максимальных поперечных остаточных напряжений близки к значениям, полученным акустическим методом. Как видно из рис. 3, а, в, продольные остаточные напряжения на расстоянии 2 мм от границы шва (измеренные тензометрическим методом) существенно ниже продольных остаточных напряжений на расстоянии 7,5 мм от границы шва.

При увеличении ширины образца, выполненного сваркой МИГ проволокой СВАМг5, до 300 мм остаточные напряжения остаются практически на том же уровне — $\sigma_{\text{ост}}^x = 140$ и $\sigma_{\text{ост}}^y = 60$ МПа (см. рис. 4, а). Дальнейшее увеличение ширины образца до 600 мм, выполненного сваркой МИГ проволокой СВАМг5, способствует возрастанию средних продольных остаточных напряжений до $\sigma_{\text{ост}}^x = 180$ МПа, при этом значения поперечных растягивающих остаточных напряжений остаются на том же уровне ($\sigma_{\text{ост}}^y = 50 \dots 60$ МПа) или становятся в 3 раза меньшими, чем максимальные продольные остаточные напряжения (см. рис. 4, б, в). С увеличением ширины образца ширина ЗТВ с продольными остаточными напряжениями возрастает до 18 мм.

В образцах шириной 70 мм, полученных сваркой МИГ проволокой СВАМг5, характер распределения поперечных остаточных напряжений в сечении ЗТВ зависит также от направления сварки (см. рис. 5). Первый максимум находится на расстоянии 20...25 мм от края образца в направлении сварки. Уровень среднего максимального поперечного растягивающего напряжения в ЗТВ по результатам шести измерений составляет $\sigma_{\text{ост}}^y = 30$ МПа. Результаты измерений поперечных остаточных напряжений в образцах, полученных сваркой ТИГ проволокой СВАМг5, не выходят за пределы стандартного отклонения остаточных

напряжений в образцах, выполненных сваркой МИГ. Однако продольные растягивающие остаточные напряжения в отдельных образцах заметно зависят от способа сварки. Средние максимальные растягивающие напряжения в образцах при сварке МИГ составляют $\sigma_{\text{ост}}^x = 75$ МПа, а при ТИГ — $\sigma_{\text{ост}}^x = 50$ МПа. При этом не зависимо от способа сварки зона с продольными растягивающими остаточными напряжениями распространяется на 13 мм от границы шва, а отношение продольных растягивающих остаточных напряжений к поперечным в ЗТВ центральной части образца составляет около 2,6.

Таким образом, в образцах одинаковой ширины сварка МИГ обеспечивает более высокие растягивающие продольные остаточные напряжения и более низкие растягивающие поперечные остаточные напряжения по сравнению с остаточными напряжениями $\sigma_{\text{ост}}^x$ и $\sigma_{\text{ост}}^y$, образующимися при сварке ТИГ в непосредственной близости к границе шва (см. рис. 2–5). При увеличении ширины образца с 70 до 600 мм продольные остаточные напряжения, формируемые при сварке МИГ, возрастают от 0,25 до 0,80 значения предела кратковременной прочности сварного соединения $\sigma_{\text{в}}$ (см. табл. 3). При сварке ТИГ продольные остаточные напряжения в 1,8 раз ниже, чем $\sigma_{\text{ост}}^x$ в образцах такого же размера ($b = 200$ мм), полученных сваркой МИГ. С увеличением ширины образца практически пропорционально увеличивается и поперечная составляющая растягивающих остаточных напряжений с сохранением отношения $\sigma_{\text{ост}}^x / \sigma_{\text{ост}}^y = 2,8$ (при сварке МИГ) и 1,4 (при сварке ТИГ).

Итак, двухосное остаточное растяжение, вызванное сваркой, распространяется в центральной части образца в ЗТВ на ширине 13...18 мм от границы шва (в образцах шириной $b = 70 \dots 600$ мм) и на длине приблизительно 0,7 общей длины шва или ширины образца. При сварке МИГ стабильные максимальные значения растягивающих остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^x = 0,8\sigma_{\text{в}}$, а $\sigma_{\text{ост}}^y = 0,3\sigma_{\text{в}}$ достигаются при ширине образца $b = 300$ мм. Причем по показателю $\sigma_{\text{ост}}^x / \sigma_{\text{ост}}^y$ можно заключить, что более жесткое напряженное состояние имеет место у соединений, полученных сваркой МИГ. Поскольку $\sigma_{\text{ост}}^x$ направлены перпендикулярно оси образца, то при испытаниях на растяжение они не суммируются с напряжениями внешнего нагружения.

Характерной особенностью распределения поперечных остаточных напряжений в ЗТВ является образование нескольких экстремальных пиков вдоль шва. При сварке МИГ количество пиковых значений поперечных растягивающих остаточных напряжений больше, а их уровень в 2 раза ниже, чем при сварке ТИГ. В образцах наиболее распространенной ширины (70 мм), полученных сваркой МИГ, значения поперечных остаточных напряжений также низки, как и в образцах большой ширины. Поперечные растягивающие остаточные напряжения в центральной части образцов, начиная с ширины 200 мм, в отдельных случаях снижаются

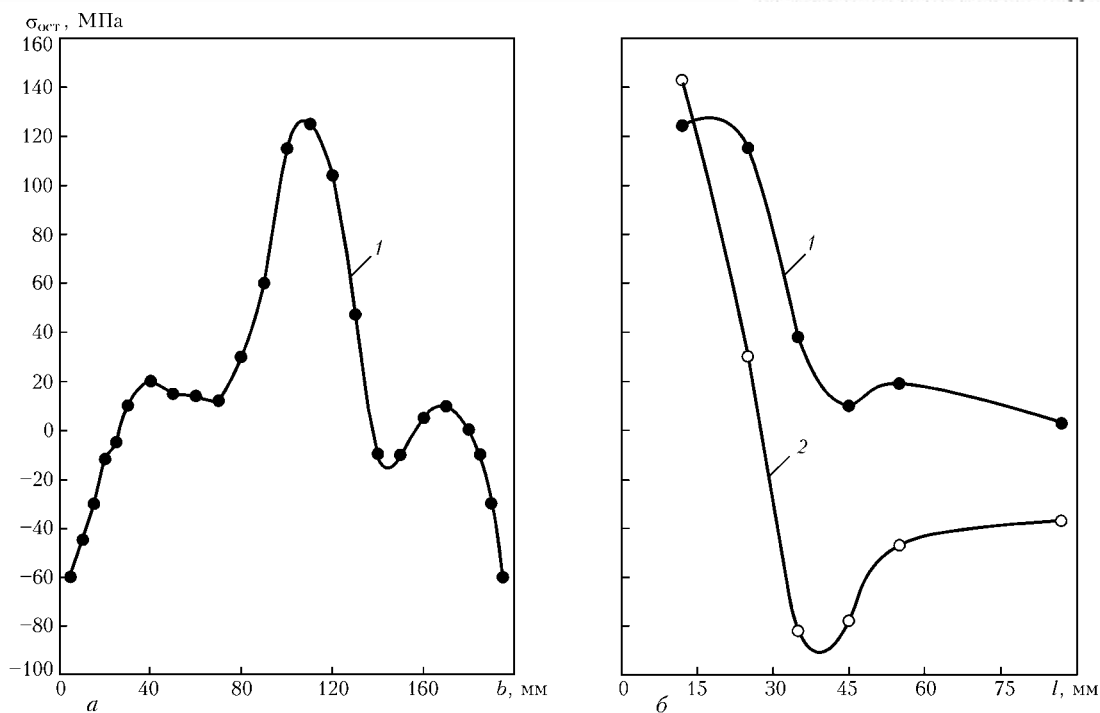


Рис. 6. Поперечные (1) и продольные (2) остаточные напряжения после точечного нагрева в центре сварного образца шириной 200 мм: а — сечение вдоль ЗТВ; б — сечение поперек шва вдоль оси образца (отсчет расстояния от центра нагрева)

до нулевого значения. При этом эпюра поперечных напряжений по ширине образца может приобретать «двугорбый вид» (см., например, рис. 3).

Использование точечного нагрева для дополнительного увеличения растягивающих остаточных напряжений в ЗТВ показало, что высокие поперечные растягивающие напряжения локализуются только вблизи зоны активного нагрева на расстоянии 35...40 мм от точки нагрева (рис. 6, б). При этом результирующие значения поперечных остаточных напряжений в сечении ЗТВ значительно возрастают только в узкой центральной зоне образца (рис. 6, а) до $\sigma_{ост}^y = 125$ МПа или $0,6\sigma_B$, что по уровню отвечает продольной составляющей растягивающих остаточных напряжений в крупногабаритных сварных образцах.

Сопротивление усталости. Усталостные испытания образцов сварных соединений показали, что для рассматриваемых способов сварки ширина образцов и соответствующие им остаточные напряжения существенно не влияют на долговечность (рис. 7). Среднестатистическая кривая усталости образцов шириной 70 мм, полученных сваркой МИГ проволокой СвАМг5, и обобщенная для всех образцов шириной 70, 200 и 500 мм, выполненных сваркой МИГ проволокой СвАМг5, практически совпадают в пределах 95 % доверительных границ (рис. 7, а). При этом среднестатистическая кривая усталости для образцов шириной 70 и 200 мм, полученных сваркой ТИГ проволокой СвАМг5, смещена вверх и совпадает с верхней границей области разброса результатов испытаний всех образцов, выполненных сваркой МИГ этой же проволокой. Ширина образцов (70 и 200 мм) не вызывает заметных изменений сопротивления усталости также для соединений, полученных сваркой МИГ и ТИГ проволокой СвАК5 (рис. 7, б). Сред-

нестатистическая кривая усталости соединений, выполненных сваркой ТИГ, находится выше кривой усталости соединений, полученных сваркой МИГ. Очевидно, более низкие поперечные и более высокие продольные растягивающие остаточные напряжения при высокопроизводительном способе сварки МИГ не являются определяющими в повышении сопротивления усталости сварных соединений, по сравнению с более неблагоприятными остаточными напряжениями, образующимися при сварке ТИГ. Рост уровней продольных и поперечных остаточных напряжений, связанный с увеличением размеров образца, не приводит к заметному снижению долговечности соединений.

В представленных способах сварки более высокое сопротивление усталости соединений, выполненных сваркой ТИГ, чем соединений, выполненных сваркой МИГ, обусловлено более низкими средними значениями коэффициента концентрации напряжений α_σ (на 11...28 %) и в 3...4 раза меньшим разбросом значений α_σ , особенно со стороны корня шва (см. табл. 2). Из полученных результатов испытаний видно, что концентрация напряжений является основной причиной зарождения усталостной трещины практически по всей ширине образцов вдоль сварного соединения. Использование сварочных проволок различных типов не вызывает существенных отклонений коэффициента концентрации напряжений в корневой части шва. Однако усталостная трещина, зарождающаяся в зоне сплавления на границе корневой выпуклости, распространяется в глубь металла шва по его толщине, при этом она существенно влияет на сопротивление усталости образцов вследствие изменения состава и механических свойств металла шва. Долговечность соединений, полученных с использованием проволоки СвАК5, повышается в многоциклового

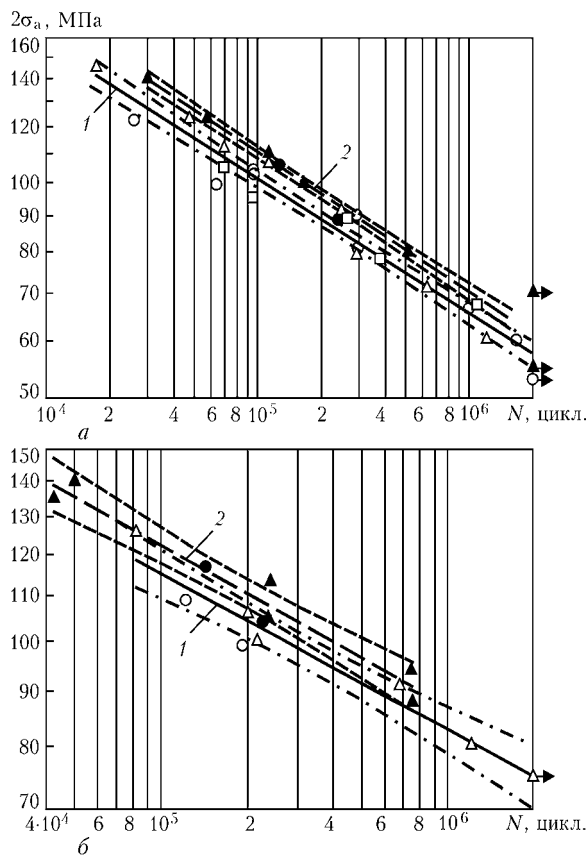


Рис. 7. Кривые усталости и их 95%-ные доверительные границы для соединений, полученных сваркой МИГ (1) и ТИГ (2) проволоками СвАМг5 (а) и СвАК5 (б): Δ , \blacktriangle — образцы шириной 70; \circ , \bullet — 200; \square — 500 мм; светлые точки — сварка МИГ, темные — ТИГ

области более чем в 4 раза по сравнению с долговечностью соединений, полученных сваркой ТИГ и МИГ с использованием проволоки СвАМг5 (рис. 8). Снятие выпуклостей без термического воздействия и изменения остаточных напряжений в металле шва приводит к существенному повышению долговечности и уровня предельного размаха напряжений соединений шириной 70 мм, выполненных сваркой МИГ проволоками СвАМг5 и СвАК5. Предельные размахи напряжений повышаются более чем на 50 %. Следовательно, сопротивление усталости соединений, полученных с применением рассматриваемых способов сварки, определяется прежде всего коэффициентом концентрации напряжений и механическими свойствами металла той зоны, где инициируется усталостное разрушение. Размеры образцов и естественная остаточная напряженность в них являются менее значимым фактором, чем геометрия швов, состав сварочной проволоки и применяемый способ сварки.

Искусственное наведение в центральной части образца шириной 200 мм у зоны концентратора дополнительных поперечных растягивающих остаточных напряжений до уровня, сопоставимого с продольными растягивающими остаточными напряжениями в соединении, вызывает снижение долговечности более чем в 2 раза, а предельного напряжения — на 10 МПа (14 %), по сравнению с соответствующими характеристиками образцов с естественной остаточной напряженностью (рис. 8).

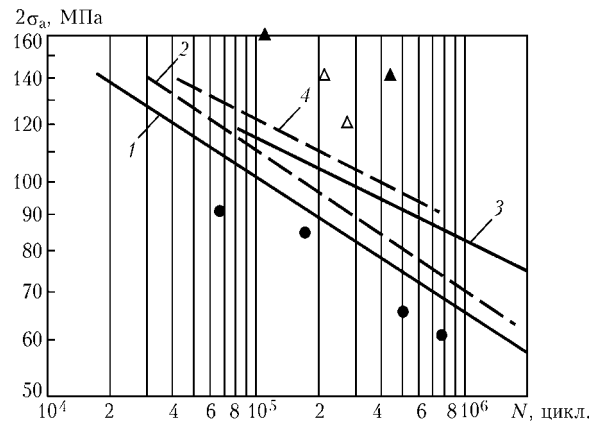


Рис. 8. Обобщенные среднестатистические кривые усталости образцов, выполненных сваркой МИГ (1, 3) и ТИГ (2, 4) проволоками СвАМг5 (1, 2) и СвАК5 (3, 4), и результаты испытаний образцов, выполненных сваркой МИГ и прошедших дополнительную обработку: \bullet — образцы шириной 200 мм с искусственно наведенными поперечными растягивающими остаточными напряжениями ($\sigma_{ост} = 125$ МПа), сварной шов выполнен проволокой СвАМг5; Δ , \blacktriangle — шириной 70 мм со снятыми выпуклостями, сварной шов выполнен соответственно проволоками СвАМг5 и СвАК5

Усталостные испытания крупногабаритных сварных образцов шириной до 500 мм позволили подтвердить тот факт, что поперечные и продольные растягивающие остаточные напряжения отличаются различным повреждающим эффектом. Увеличение продольных растягивающих остаточных напряжений в ЗТВ стыковых соединений с $\sigma_{ост}^x = 50...70$ (при $b = 70$ мм) до $\sigma_{ост}^x = 130...140$ МПа (при $b = 200$ мм) и даже до $\sigma_{ост}^x = 160...180$ МПа (при $b = 500$ мм) не вызывает существенных изменений долговечности, если ее значения в 3 раза меньше, чем поперечные растягивающие напряжения (в случае сварки МИГ). Эти напряжения в соединениях направлены перпендикулярно внешним растягивающим напряжениям. Вместе с напряжениями внешнего растяжения они создают двухосное растяжение в металле ЗТВ. Как известно [23], переход от одно- к двухосному растяжению является основным условием сдерживания пластического деформирования металла, что может являться причиной повышения предела текучести и снижения коэффициента концентрации напряжений.

Заметное (более чем в 2 раза) снижение долговечности при увеличенном значении поперечной составляющей растягивающих остаточных напряжений до $\sigma_{ост}^y = 125$ МПа в образцах сварных соединений, полученных с точечным нагревом по сравнению с исходными образцами ($\sigma_{ост}^y = 60...70$ МПа) при постоянном значении продольных остаточных напряжений обусловлено взаимодействием этих напряжений с напряжениями внешней нагрузки. Главным условием, обеспечивающим повышенную долговечность сварных соединений, является применение высоких скоростей сварки при минимальном тепловложении, а также выполнение сплошных непрерывных швов, что способствует существенному снижению поперечной составляющей растягивающих остаточных напряжений. В этом случае можно допускать высокие значения продольной



составляющей растягивающих остаточных напряжений, которая не только не вызывает повреждающего эффекта в условиях усталости сварных соединений, но и может компенсировать влияние поперечной составляющей растягивающих остаточных напряжений при условии $\sigma_{ост}^y \leq 1/3\sigma_{ост}^x$, а для проведения усталостных испытаний можно использовать принятые в практике сварные образцы небольших размеров.

Выводы

1. Установлено, что применение автоматизированных способов дуговой сварки стыковых соединений сплава АД33Т1 толщиной 6 мм на отдельных образцах шириной 70...600 мм с поперечным швом напроход способствует образованию в центральной части ЗТВ растягивающих остаточных напряжений с отношением уровня продольных напряжений к поперечным 3:1 (при сварке МИГ) и 1,4:1,0 (при сварке ТИГ). В случае сварки МИГ максимально стабильного уровня ($0,8\sigma_B$) продольные растягивающие остаточные напряжения достигают в ЗТВ при ширине образца более 300 мм. При одинаковой ширине образцов ($b = 200$ мм) поперечные растягивающие остаточные напряжения при сварке МИГ в 1,8 раза ниже, чем при сварке ТИГ.

2. При действии циклической нагрузки поперек сечения сварного шва роль продольных и поперечных по отношению к шву растягивающих остаточных напряжений при усталостном повреждении не тождественна. Увеличение продольных остаточных напряжений от 40 до 160 МПа за счет увеличения ширины образца при сварке МИГ практически не снижает долговечность соединения. Однако увеличение за счет дополнительных мер поперечных растягивающих остаточных напряжений от 40 до 125 МПа при неизменном уровне продольных остаточных напряжений снижает долговечность образцов более чем в 2 раза.

3. Не целесообразно применять крупногабаритные образцы для проведения усталостных испытаний соединений алюминиевых сплавов, свариваемых способом МИГ напроход, поскольку увеличение ширины образца более 70 мм не приводит к существенному увеличению поперечной составляющей растягивающих остаточных напряжений. При этом нет необходимости в применении дополнительных мер по повышению поперечных остаточных напряжений в образцах малой ширины, поскольку концентрация напряжений, обусловленная выпуклой формой шва, является главным повреждающим фактором при циклической нагрузке.

1. Труфьяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
2. Шонин В. А. Анализ результатов усталостных испытаний сварных соединений сплава АМГ6 // Автомат. сварка. — 1982. — № 3. — С. 71–73.

3. Sanders W. W., Day R. H. Fatigue behavior of aluminum alloy weldments // WRS Bulletin. — 1983. — № 266. — 21 p.
4. Dvoretzkii V. I., Mikheev P. P., Shonin V. A. A procedure of fatigue analysis of aluminum structure welded joints. — S. 1., [1984]. — 16 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIV XIII-1138-84).
5. Келси Р. А., Нордмарк Г. Е. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости стыковых соединений алюминиевых сплавов // Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения: Материалы советско-американского семинара, Киев, июнь 1981 г. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 119–126.
6. Шонин В. А. Сопротивление усталости сварных соединений алюминиевых сплавов с учетом влияния остаточных напряжений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1984. — 16 с.
7. РД 50-551-85. Расчеты и испытания на прочность. Расчетно-экспериментальные методы оценки сопротивления усталости сварных соединений: Метод. указания. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 52 с.
8. Шонин В. А. Пределы ограниченной выносливости сварных соединений сплава АМГ6 // Автомат. сварка. — 1990. — № 4. — С. 12–18.
9. РД 50-694-90. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций: Метод. указания. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 84 с.
10. Казимиров А. А., Недосека А. Я. Об остаточных напряжениях и деформациях, возникающих при сварке сплава АМГ5В // Автомат. сварка. — 1962. — № 10. — С. 16–21.
11. Особенности распределения поверхностных остаточных напряжений в сварных плитах из сплава аниаль / С. Н. Киселев, В. А. Хаванов, Л. М. Скорняков, В. И. Гречинкин // Свароч. пр-во. — 1966. — № 12. — С. 6–8.
12. Tanaka E., Hirata K., Takeuchi K. Residual stress in butt-welded 5083 aluminum alloys. Studies on residual stresses in welded joints of aluminum alloys // Light Metals. — 1970. — № 1. — P. 7–15.
13. Недосека А. Я. Остаточные напряжения в пластинах при сварке стыкового шва // Автомат. сварка. — 1974. — № 11. — С. 32–38.
14. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуца, В. К. Лебедев. — Киев: Наук. думка, 1974. — 106 с.
15. Окерблом Н. О. Сварочные напряжения в металлоконструкциях. — М.; Л.: Машгиз, 1950. — 160 с.
16. Махиенко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
17. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных соединений алюминиевых сплавов / В. И. Труфьяков, П. П. Михеев, В. А. Шонин, М. П. Порицкий // Автомат. сварка. — 1976. — № 5. — С. 37–39.
18. Шонин В. А. Влияние остаточных напряжений на сопротивление несущего элемента из сплава АМГ6 в месте приварки поперечных ребер // Там же. — 1978. — № 1. — С. 70–71.
19. Михеев П. П., Шонин В. А. Сопротивление усталости сварных соединений алюминиевых сплавов с учетом остаточной напряженности // Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения: Материалы советско-американского семинара, Киев, июнь 1981 г. — Киев: Наук. думка. — 1984. — С. 113–118.
20. Мэддокс С. Дж. Совершенствование правил расчета на усталость сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2003. — № 10/11. — С. 97–104.
21. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустоупругость. — Киев: Наук. думка, 1977. — 152 с.
22. Махиенко В. И., Мосенкис Р. Ю. Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами // Автомат. сварка. — 1985. — № 8. — С. 7–18.
23. Осаулenco Л. Л., Котенко Э. В. Двухосное растяжение и чувствительность материала к концентрации напряжений // Пробл. прочности. — 1981. — № 3. — С. 21–25.

The paper presents the results of evaluation of residual stresses in butt welded joints of aluminium alloy AD33 (6061) 6 mm thick on samples of different width (70...600 mm) produced by TIG and MIG welding processes. Experiments are used to demonstrate the influence of longitudinal and transverse tensile residual stresses on the strength and fatigue life of welded joints with a transverse weld under axial load.

Поступила в редакцию 21.05.2004