

УДК 621.791

**В. П. Куликов, д-р техн. наук, проф., В. В. Десятник, канд. техн. наук, доц.,
Е. В. Логвина**

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ ДУГОВОЙ СВАРКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Приведены причины самопроизвольного деформирования изделий по окончании процесса сварки и последующей механической обработки. Обозначены пути обеспечения точности размеров и формы изделий, изготавливаемых дуговой сваркой и последующей механической обработкой, с минимальными затратами и высоким коэффициентом использования материалов в процессе изготовления и при эксплуатации.

Большинство технологических операций, при помощи которых создаются твердые тела, детали машин, элементы конструкций, сооружения и т. д., приводят к образованию остаточных напряжений. Как правило, величина этих напряжений незначительна. Будучи замороженными в заготовках и изделиях, остаточные напряжения со временем могут проявить себя как с положительной, так и с отрицательной стороны. По окончании некоторых технологических операций (сварка, термическая и механическая обработка и др.) остаточные напряжения в элементах конструкций возрастают и могут привести к искажению формы и изменению размеров последних, а также невозможности их эксплуатации и даже самопроизвольному разрушению.

Изготовление сварных конструкций с соблюдением проектных форм и размеров вызывает значительные трудности, как вследствие недостаточной точности заготовок, так и в связи с теми погрешностями, которые допускаются при выполнении ряда производственных операций. Однако отмеченные причины являются не единственными; весьма значительное влияние на точность готовой сварной конструкции оказывают деформации, возникающие в результате неравномерного нагрева элементов при сварке, а также вторичные деформации, вызываемые различными технологическими операциями, выполняемыми по окончании процесса свар-

ки, связанные с нарушением равновесия внутренних сил (перераспределение поля остаточных напряжений), наведенных процессом сварки [1].

На эксплуатационные свойства металлических элементов конструкций и изделий в целом наряду с исходными геометрическими параметрами большое влияние оказывает их структурное и напряженное состояние, которое может способствовать самопроизвольному изменению формы и размеров с течением времени. Последнее обстоятельство является значительным препятствием на пути обеспечения непрерывно возрастающих требований к точности и надежности прецизионных машин и приборов. При этом необходимое постоянство размеров должно обеспечиваться в условиях длительной эксплуатации при постоянной и переменной температурах (в интервале от -50 до $+100$ °С).

В настоящее время допустимые отклонения линейных размеров высокоточных сварных конструкций машино- и приборостроения в процессе эксплуатации достигли уровня, на несколько порядков ниже, величины самопроизвольных деформаций сварных конструкций во времени [2].

Изучению закономерностей процесса самопроизвольного деформирования элементов сварных конструкций с течением времени посвящены работы [2–12]. В этих работах проведены ис-

следования сварных соединений из различных групп конструкционных материалов – низкоуглеродистых, низколегированных низкоуглеродистых, высоколегированных аустенитных, хромистых сталей, среднеуглеродистой стали 35, алюминиевых и титановых сплавов.

Анализ результатов указанных работ свидетельствует о том, что:

- самопроизвольные деформации с течением времени присущи сварным соединениям всех исследованных групп конструкционных материалов;

- деформирование изделий наиболее интенсивно протекает в первые часы (сутки, недели, месяцы) с последующим монотонным затуханием и хорошо описывается экспоненциальной функцией (однако процесс самопроизвольного деформирования элементов сварных конструкций не заканчивается за время проведения исследований (до 1,5–2 лет));

- знак и величина деформаций во времени элементов сварных конструкций определяются химическим составом свариваемого материала, режимами процесса сварки и температурой вылеживания (хранения). Максимальные деформации во времени для ряда конструкционных материалов могут достигать 50 % остаточных сварочных деформаций.

Первые шаги по изучению механизма самопроизвольного деформирования сварных соединений с течением времени были сделаны авторами работы [13]. В дальнейших исследованиях [2] удалось существенно расширить представления о природе явления размерной нестабильности элементов сварных конструкций. К основным причинам, вызывающим самопроизвольное деформирование изделий, получаемых сваркой, они относят:

- фазовые превращения, связанные с распадом метастабильных составляющих структуры;

- старение неустойчивых структур;
- релаксацию остаточных сварочных напряжений I рода;

- ползучесть материала сварного со-

единения под действием остаточных напряжений.

Полученные результаты показывают, что напряжения I рода в зоне метастабильных фазоструктурных составляющих сварного соединения могут играть как отрицательную, так и положительную роль с точки зрения повышения их устойчивости, а следовательно, и размерной стабильности. Результирующий эффект зависит от соотношения знака напряжений и деформаций, от объемного эффекта фазоструктурного превращения. При их совпадении устойчивость и размерная стабильность элементов сварных конструкций понижаются и, наоборот, при противоположных знаках превращение подавляется, а размерная стабильность последних повышается. Важным является вывод о том, что при наличии метастабильных составляющих структуры главной причиной размерной нестабильности элементов сварных конструкций является распад неустойчивых составляющих структуры свариваемого материала, а релаксация напряжений является следствием этого процесса. Остаточные же напряжения влияют лишь на его интенсивность [2, 14].

Поскольку напряженное состояние реальных деталей машин и сварных конструкций является сложным и уровень действующих остаточных напряжений (а также напряжений, вызванных приложением внешних нагрузок) в различных сечениях изделия неодинаков, процессы релаксации протекают в разных участках деталей и элементов с неодинаковой скоростью, что вызывает самопроизвольное искажение формы и изменение размеров.

По данным различных авторов [15–19] остаточные напряжения, вызванные технологическими операциями, необходимыми для изготовления изделий, могут достигать значительной величины. Так, после операции точения в поверхностном слое растягивающие на-

пряжения могут достигать 700 МПа; глубина их распространения достигает 50–200 мкм. При фрезеровании возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения; последние более характерны для попутного фрезерования деталей из жаропрочных сплавов. Фрезерование деталей из титановых сплавов чаще всего сопровождается образованием сжимающих напряжений, и толщина наклепанного слоя в результате фрезерования не превышает 0,2 мм. Величина растягивающих напряжений в поверхностном слое при фрезеровании образцов из стали 35 составляет 900 МПа. После шлифования, за редким исключением, возникают растягивающие напряжения до 1500 МПа. Величина и знак макронапряжений после механического полирования деталей машин зависят от предшествующей обработки, но в большинстве случаев полирование способствует возникновению незначительных сжимающих напряжений (до 300 МПа). Операция сверления создает напряженное состояние преимущественно в окрестности границ отверстий, в изделии накапливается запасенная энергия. Она несущественна, если отверстий мало или они расположены далеко друг от друга. Но если отверстий много и они расположены достаточно близко друг к другу, остаточные напряжения и накопленная энергия могут быть значительными. Именно это и произошло в случае высверливания большого числа отверстий в корпусе коллектора парогенератора на одной из атомных электростанций, что привело к образованию трещины и выбросу радиоактивности.

Согласно [2] наведение поля остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из стали 35 за счет наклепа при механической обработке резко снижает релаксационную стойкость и размерную стабильность последних.

Как показывают результаты исследований [1, 19], на величину остаточных напряжений влияет способ сварки, параметры ее режима, применяемое сварочное

оборудование, температура окружающей среды, жесткость закрепления свариваемой конструкции, последовательность операций сборки и сварки, форма и размеры поперечного сечения свариваемой детали, расположение сварных швов, последовательность их наложения, геометрические параметры сварных швов, начальное напряженное состояние материала и др.

Если же к сварной конструкции предъявляются повышенные требования по точности размеров и формы, а также к качеству рабочих поверхностей (шероховатость, поверхностная твердость и др.), такие изделия необходимо подвергать последующей механической обработке.

Однако в результате последующей механической обработки, направленной на устранение дефектов заготовительных, сварочных операций, при удалении слоев материала с различных пространственных поверхностей сваренного изделия происходит освобождение конструкции от остаточных напряжений (снятие части эпюры остаточных напряжений), наведенных заготовительными операциями и дуговой сваркой. При этом нарушается взаимное расположение различных поверхностей и происходит искажение формы. Причем эти изменения могут наступать как непосредственно в процессе или сразу после механической обработки элементов сварных конструкций, так и после вылеживания в течение трех-четырёх недель.

В [1, 20–23] отмечалось, что увеличению деформации при последующей механической обработке способствует повышение деформаций по окончании процесса дуговой сварки, большие припуски на последующую механическую обработку, большие расстояния от центра тяжести поперечного сечения припуска на механическую обработку до центра тяжести поперечного сечения элемента и малая жесткость сварной конструкции.

Если в конструкции площадь поперечного сечения припуска на после-

дующую механическую обработку составляет F_{np} , а полная площадь сечения после механической обработки равна F_0 , то стрела прогиба $f_{обр}$, возникшего в результате послесварочной механической обработки, выражается следующей формулой:

$$f_{обр} = f_{св} \frac{\frac{z_{np}}{z'} + A}{\frac{z'}{F_0} + A}$$

где $f_{св}$ – стрела прогиба, вызванного сварочными операциями; z' – расстояние от центра тяжести сварных швов до центра тяжести поперечного сечения до послесварочной механической обработки; z_{np} – расстояние от центра тяжести припуска на послесварочную механическую обра-

ботку до центра тяжести поперечного сечения элемента сварной конструкции до обработки; A – характеристика сечения до послесварочной механической обработки:

$$A = \frac{F}{J} z_{np}^2,$$

где F и J – площадь и момент инерции поперечного сечения элемента конструкции до послесварочной механической обработки.

На рис. 1 представлена зависимость деформаций конструкций, вызываемых послесварочной механической обработкой от величины относительных размеров припуска на механическую обработку.

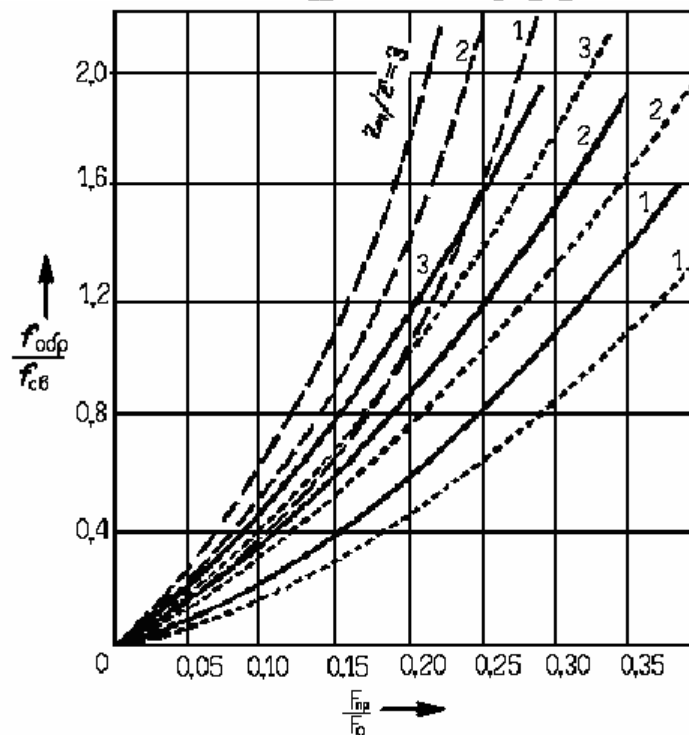


Рис. 1. Зависимость деформаций конструкций, вызываемых послесварочной механической обработкой от величины относительных размеров припуска на механическую обработку при значениях отношения $z_{np}/z'=1$, $z_{np}/z'=2$, $z_{np}/z'=3$ и при различных значениях характеристики сечения до послесварочной механической обработки A (..... $A = 1$; — $A = 1,2$; --- $A = 2$)

В настоящее время на практике при проектировании не всегда определяют ожидаемые деформации сварной конструкции и уровень остаточных напряжений, и потому назначают большой припуск на послесварочную механическую обработку, что влечет за собой значительные деформации изделия, вызванные перераспределением поля остаточных напряжений, наведенных заготовительными операциями и процессом дуговой сварки.

Так, в [24] проводились исследования внутренних остаточных напряжений в образцах из стали 45, наплавленных в среде углекислого газа сварочной проволокой Св-20Х13. Последующую механическую обработку проводили в два этапа – растачивание от диаметра 6 до 38 мм и обтачивание от диаметра 63,5 до 57,7 мм. Результаты исследований показывают, что в наплавленном образце имеются значительные остаточные напряжения. При растачивании по мере удаления внутренних слоев металла под действием внутренних напряжений образец увеличивался по длине и наружному диаметру. При удалении наружных слоев металла размеры испытываемого образца уменьшались, причем на кривой деформации ярко выражен перегиб в зоне наплавленного металла. После удаления наплавленного слоя деформации образца имели незначительную величину. При наплавке наблюдаются сжимающие напряжения в наружных слоях наплавленного металла. Зона с высокими растягивающими напряжениями смещается в глубину наплавленного слоя.

В настоящее время обеспечение точности формы и размеров сварных конструкций, получаемых при помощи дуговой сварки и последующей механической обработки, достигается за счет применения следующих принципов:

- уменьшение пластической деформации при нагреве и уменьшение объема металла, участвующего в пластическом деформировании в процессе неравномерного нагрева (например, за счет предваритель-

- ного или сопутствующего подогрева или уменьшения числа сварных швов, их калибра, погонной энергии дуговой сварки, путем искусственного охлаждения сварного соединения, приложением растягивающих усилий в процессе сварки и др.);

- если на стадии нагрева возникли пластические деформации укорочения определенной величины, то на стадии охлаждения следует стремиться увеличить пластические деформации удлинения элементов сварной конструкции проковкой, прокаткой, растяжением, изгибом, жестким закреплением в приспособлении, последующей термической обработкой (высоким отпуском) и др.;

- компенсация возникающих деформаций элементов сварных конструкций путем создания предварительных обратных деформаций, равных по величине возникающим, симметричного расположения сварных швов, рациональной последовательности операций сборки и дуговой сварки.

Достаточно часто для предотвращения деформаций сварных конструкций перед послесварочной механической обработкой предусматривают термическую, предназначенную для снятия остаточных напряжений, наведенных заготовительными операциями и процессом дуговой сварки. Но, как показывает практика, применение термической обработки перед механической не всегда оправдано, поскольку она не только повышает трудоемкость изготовления деталей машин и достаточно часто значительно увеличивает деформации элементов сварной конструкции, что может привести к невозможности ее эксплуатации, а порой и к разрушению конструкции.

Однако можно обеспечить необходимую точность формы и размеров изделий, изготавливаемых дуговой сваркой и последующей механической обработкой, и без применения термической обработки перед механической.

Для этого необходимо выполнение сварочных операций производить в последовательности, обеспечивающей минимальные деформации элементов конструкции от сварки, соответственно назначать минимальный припуск на последующую механическую обработку, которую следует выполнять двумя или несколькими ступенями, т. е. технологию процесса дуговой сварки и последующей механической обработки разрабатывать совместно, учитывая влияние конструкторско-технологических факторов как на стадии проектирования, так и на стадии изготовления.

Введя критерий – интенсивность введения или высвобождения энергии деформации (с какой скоростью энергия вводится в тело в результате дуговой сварки или высвобождается при последующей механической обработке), – можно прогнозировать точность формы и размеров сварных конструкций в процессе изготовления и при эксплуатации.

Энергия, накопленная твердым телом, в результате нагрева элементов сварной конструкции, вызванного процессом дуговой сварки является потенциальной энергией деформации и выражается формулой

$$W = \int_V W_0 dx dy dz,$$

где W_0 – удельная энергия деформации конструкции.

$$dW_0 = \frac{\partial W_0}{\partial \varepsilon_{ij}} d\varepsilon_{ij}.$$

Частная производная от удельной потенциальной энергии W_0 по деформациям ε_{ij} равна соответствующему напряжению

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W_0}{\partial \varepsilon_{ij}}.$$

Интенсивность введения энергии деформации при сварке и высвобождения энергии деформации при послесварочной механической обработке определяется по

формуле

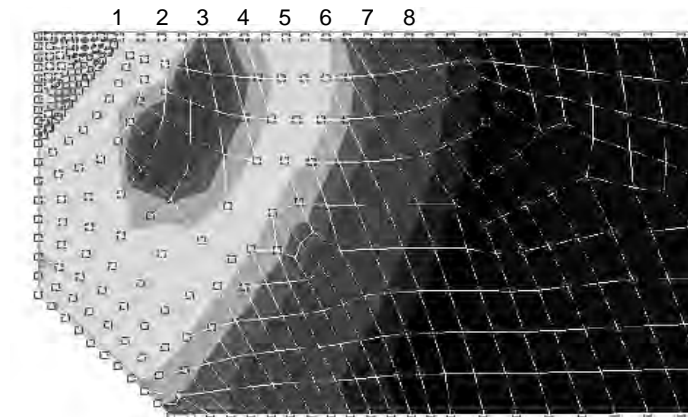
$$J_w = \int_t \int_V \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dx dy dz dt.$$

Интенсивность введения энергии деформации при дуговой сварке и высвобождения энергии в результате послесварочной механической обработки (точение, фрезерование, сверление отверстий, нарезание резьбы и др.) существенно влияет на изменение формы и размеров готового изделия.

Графики, отражающие зависимость распределения поля остаточных напряжений и характер деформирования изделия от интенсивности введения энергии деформации при полуавтоматической сварке в среде защитных газов, приведены на рис. 2 и 3.

Анализ полученных теоретических данных показывает, что уменьшение интенсивности введения энергии деформации при дуговой сварке позволяет снижать величину наведенных остаточных напряжений, и как следствие, обеспечивать уменьшение их перераспределения в результате последующей механической обработки. Следовательно, деформации готового изделия после сварки и механической обработки могут быть сведены к минимуму или устранены полностью без дополнительных затрат энергии (высокий отпуск после сварки).

Оптимизировать интенсивность введения или высвобождения энергии деформации возможно за счет правильного выбора параметров режима сварки и механической обработки, рациональной последовательности сборки, сварки и механической обработки, предварительного подогрева изделия или его искусственного охлаждения и др. Однако для получения технологичной конструкции, отвечающей требованиям точности формы и размеров, необходимо технологический процесс сварки и последующей механической обработки разрабатывать совместно.



Распределение поля напряжений в зависимости от интенсивности введения энергии деформации при полуавтоматической сварке в среде защитных газов

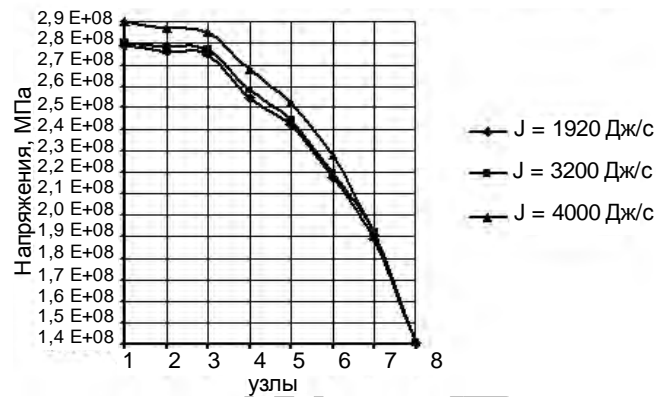
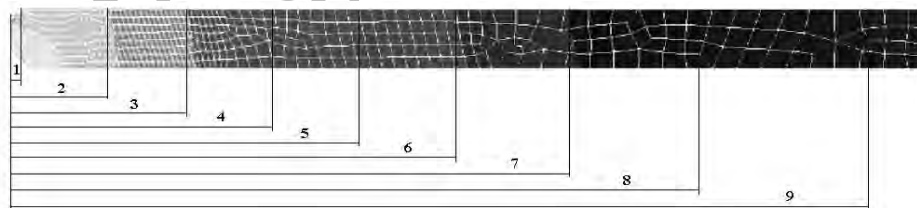


Рис. 2. Зависимость распределения поля остаточных напряжений от интенсивности введения энергии деформации J при полуавтоматической сварке в среде защитных газов



Распределение деформаций изделия по сечениям в зависимости от интенсивности введения энергии деформации при полуавтоматической сварке в среде защитных газов

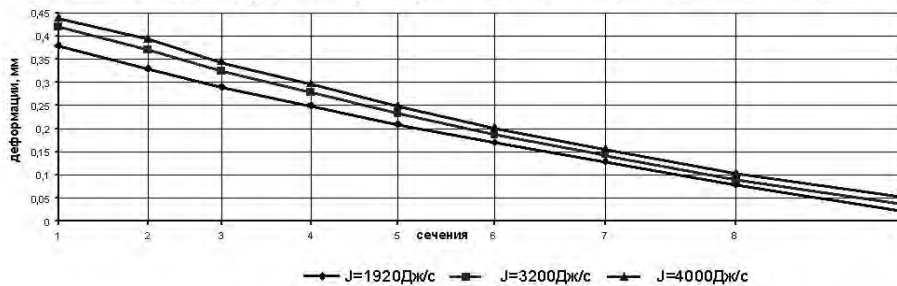


Рис. 3. Зависимость величины деформаций сварного изделия от интенсивности введения энергии деформации J при полуавтоматической сварке в среде защитных газов

Такая технология, учитывающая величину и характер перераспределения поля остаточных напряжений, наведенных технологическими операциями (сварка и последующая механическая обработка) при изготовлении сварных конструкций машино- и приборостроения, позволит во многих случаях избежать термической обработки перед механической и повысить технологичность сварной конструкции, снизив трудоемкость ее изготовления и себестоимость готовой продукции.

Таким образом, во избежание деформирования изделий, изготавливаемых дуговой сваркой и последующей механической обработкой, в результате перераспределения поля остаточных напряжений, наведенных заготовительными операциями и процессом сварки, при удалении слоев материала с различных пространственных поверхностей сваренного изделия, а вместе с тем и части эпюры остаточных напряжений, необходимо определять уровень остаточных напряжений и стремиться к его минимизации. Снизить уровень остаточных напряжений, наведенных различными технологическими операциями, можно уменьшая интенсивность введения энергии деформации при сварке и высвобождения ее в результате последующей механической обработки за счет рациональной последовательности сборки, сварки и последующей механической обработки, многопроходной сварки (уменьшения числа и калибра сварных швов), выбора оптимальных режимов сварки и механической обработки, т. е. совместной разработки технологического процесса сварки и последующей механической обработки, учитывая влияние конструкторско-технологических факторов как на стадии проектирования, так и на стадии изготовления. Прогнозирование и расчет поведения технологической системы на стадии проектирования позволяет подобрать технологию изготовления высокоточных сварных конструкций машино- и приборостроения с минимальными затратами и

высоким коэффициентом использования материалов за счет уменьшения послесварочных деформаций, снижения припусков на механическую обработку, отказа от термической обработки изделия перед механической и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Окерблом, Н. О.** Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н. О. Окерблом. – М.–Л. : Машиностроение, 1964. – 420 с. : ил.
2. **Сагалевич, В. М.** Стабильность сварных соединений и конструкций / В. М. Сагалевич, В. Ф. Савельев. – М. : Машиностроение, 1986. – 264 с. : ил.
3. **Бакши, О. А.** О стабильности сварочных деформаций / О. А. Бакши, А. С. Рудаков, В. М. Шахматов // Вопросы сварочного производства : тр. Челябинского политехнического ин-та. – М.–Свердловск, 1959. – Вып. 16. – С. 5–13.
4. **Гаврюшев, В. И.** Геометрическая стабильность металлических приборных конструкций и технологические методы ее повышения / В. И. Гаврюшев. – Л. : Румб, 1981. – 145 с.
5. **Грузд, А. А.** Снижение сварочных напряжений в пластинах вибраций / А. А. Грузд, О. И. Зубченко, А. А. Казимиров // Автоматическая сварка. – 1972. – № 5. – С. 13–15.
6. **Казимиров, А. А.** Деформации и напряжения в сварочных соединениях алюминиевого сплава 01915 / А. А. Казимиров, А. Я. Недосека, А. А. Грузд // Автоматическая сварка. – 1970. – № 4. – С. 15–18.
7. **Миньков, И. С.** Влияние обработки вибрационным нагружением на размерную стабильность сварных узлов / И. С. Миньков, М. Н. Могильнер, В. Г. Полнов // Сварочное производство. – 1980. – № 2. – С. 26–27.
8. **Мордвинцева, А. В.** Деформации сварных конструкций со временем / А. В. Мордвинцева // Вопросы прочности и технологии сварки. – М., 1955. – Вып. 37. – С. 54–63.
9. **Прохоров, Н. Н.** Физические процессы в металлах при сварке в 2 т. / Н. Н. Прохоров. – М. : Металлургия, 1976. – Т. 2. – 599 с.
10. **Рунов, А. Е.** Контроль и корректирование количества ферритной фазы в наплавленном металле сварных соединений аустенитных сталей / А. Е. Рунов // Сварочное производство. – 1969. – № 6. – С. 27–29.
11. **Hansen, H.** Uber den Einfluss der Schweisseigenspannungen auf die Stabilitat der schweissten Konstruktionen / H. Hansen // «Wiss. Z. – Techn., Hochsch. O. Guericke Magdeburg». – 1976. – № 1. – S. 31–36.

12. **Silas, G. H.** supord stabilizaformeilapiese sudate sub actimed unor solicitari eschilante / G. H. Silas, H. J. Klepp, L. A. Brinden // Bui. sli. si. techn. Inst, politehn. Timisoara, ser. mec, 1978 (1979). – №. 1. – S. 13–14.

13. **Мордвинцева, А. В.** Превращение остаточного аустенита – основная причина деформирования сварных конструкций / А. В. Мордвинцева // МиТОМ. – 1956. – № 7. – С. 48–54.

14. **Хенкин, М. Л.** Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении / М. Л. Хенкин, И. Х. Локшин. – М. : Машиностроение, 1974. – 254 с.

15. **Биргер, И. Л.** Остаточные напряжения / И. Л. Биргер. – М. : Машиностроение, 1968. – 247 с.

16. **Борздыка, А. М.** Релаксация напряжений в металлах и сплавах / А. М. Борздыка, Л. Б. Гецов. – М. : Metallurgia, 1978. – 255 с.

17. **Винокуров, В. А.** Сварочные деформации и напряжения / В. А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1968. – 236 с.

18. **Коцюбинский, О. Ю.** Стабилизация размеров чугунных отливок / О. Ю. Коцюбинский. – М. : Машиностроение, 1974. – 296 с.

19. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г. Н. Чернышев [и др.] ; отв. ред. Г. Н. Чернышев. – М. : Наука, Физматлит, 1996. – 240 с. : ил.

20. **Окерблом, Н. О.** Сварочные деформации и напряжения / Н. О. Окерблом. – М.–Л. : Машгиз, 1948. – 252 с.

21. **Окерблом, Н. О.** Расчет деформаций металлоконструкций при сварке / Н. О. Окерблом. – М.–Л. : Машгиз, 1955. – 212с.

22. **Окерблом, Н. О.** Проектирование технологии изготовления сварных конструкций (расчетные методы) / Н. О. Окерблом, В. П. Демянцевич, И. П. Байкова.– Л. : Судпромгиз, 1963. – 602 с.

23. **Окерблом, Н. О.** Комбинированные сварные конструкции / Н. О. Окерблом. – Л. : Судпромгиз, 1962. – 100 с.

24. **Шадричев, В. А.** Исследование внутренних остаточных напряжений в образцах из стали 45, наплавленных у углекислом газе проволокой 20Х13 / В. А. Шадричев, В. А. Смирнов, В. И Сидоркин // Сварочное производство. – 1973. – № 5. – С. 32–33.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 01.03.2007

V. P. Kulikov, V. V. Desyatnik, E. V. Logvina
Support of accuracy of the products produced
by arc welding and machining
Belarusian-Russian University

The reasons of spontaneous deformation of products upon termination of process of welding and the subsequent machining are given. Ways of support of accuracy of the sizes and forms of the products produced by arc welding and the subsequent machining, with the minimum costs and high material ratio of during manufacturing and at operation are defined.