

МИНИСТЕРСТВО СТАНКОСТРОИТЕЛЬНОЙ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИИ  
ПО МАШИНОСТРОЕНИЮ (НИИМаш)

СЕРИЯ С-1 СТАНКОСТРОЕНИЕ

Л. П. ЧЕРКАССКАЯ, Л. М. ФИНКЕЛЬ

## СВАРНЫЕ БАЗОВЫЕ ДЕТАЛИ СТАНКОВ И МАШИН

Черкасская Л. П., Финкель Л. М. Сварные базовые детали станков и машин. Обзор. М., НИИМаш, 1981, 42 с., 5 табл., 6 илл.

В обзоре рассматриваются актуальные проблемы совершенствования расчета, проектирования и изготовления сварных базовых деталей станков и машин. Высокоэффективные способы сварки, позволяющие повысить производительность процесса изготовления сварных базовых деталей, обеспечить требуемое качество сварных соединений и уменьшить деформацию сварных конструкций.

Описан прогрессивный способ снижения остаточных напряжений и стабилизации размеров сварных базовых деталей путем виброобработки после сварки.

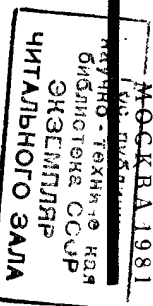
На основе анализа и обобщения передового отечественного и зарубежного опыта приводятся рекомендации по использованию наиболее прогрессивных решений указанных проблем.

Обзор предназначен для инженерно-технических работников, занятых проектированием, разработкой сварных конструкций и внедрением в производство новых технологических процессов сварочного производства.

45-81  
270063

ВВЕДЕНИЕ

Э81-25-753



В связи с неуклонным ростом единичной мощности машин и агрегатов, в том числе станков, кузнечно-прессового и литейного оборудования, возникает проблема создания станков и машин большего габарита. С увеличением размеров базовых деталей в традиционном литом исполнении повышаются расходы на дорогостоящую модельную оснастку, усложняется процесс изготовления литых заготовок и повышается риск получения брака в отливках. С другой стороны, возрастают требования к точности обработки, а следовательно, и к жесткости базовых деталей. Однако возможности повышения жесткости литых базовых деталей без существенного увеличения их массы ограничены. Поэтому в последние годы вселяется вопрос о замене литых конструкций сварными, обладающими по сравнению с первыми рядом важных технико-экономических преимуществ: меньшими массой, металлогемкостью и себестоимостью изделий, сроком их изготовления; лучшими условиями создания и совершенствования новых моделей станков вследствие того, что конструктивные изменения могут быть внесены на любой стадии изготовления; простой конфигурации, возможностью приближения к оптимальной расчетной форме базовой детали вследствие свободы формообразования; большей статической и динамической жесткостью.

Наиболее наглядно эти преимущества проявляются при индвидуальном и мелкосерийном производстве, в частности при изготовлении тяжелых и уникальных станков и прессов. Так, например, переход на сварно-кованое исполнение станины преса усилием 1250 тс позволил снизить ее массу до 70 т (масса литой станины — 100 т) и значительно упростить процесс изготовления [1]. Сварные конструкции составляют 80% общей массы самого мощного в Евро-

пе гидравлического пресса усилием 65 000 т, выпускаемого Новокраматорским машиностроительным заводом им. В. И. Ленина [2].

Проведенный ВИСПОМ сравнительный анализ фактических затрат на изготовление оснований станка модели 16К20 на московском станкостроительном заводе «Красный протектарий» им. А. И. Ефремова при программе выпуска 12 000 шт. в год дает основное представление о целесообразности зрения о целесообразности перевода на сварное исполнение деталей только единичного и мелкосерийного производства [45]. Об этом же свидетельствуют некоторые зарубежные исследования [26].

Сварное исполнение базовых деталей металлорежущих станков все шире применяют ведущие станкостроительные фирмы США, ГДР, Японии, ФРГ, Италии и других промышленно развитых стран. Фирма Сопат (Италия), в частности, изготавливает со сварными базовыми деталями токарные станки одно- и двухшпиндельного типа, специальные станки глубокого сверления с системой ЧПУ серии Деерматис и др. Одним из крупнейших предприятий по изготовлению станков со сварными базовыми деталями является комбинат Фритз Некерт (г. Карл-Маркс-Штадт, ГДР). На Лейпцигской ярмарке, проводившейся в мае 1979 г., комбинат представил обрабатывающий центр с системой ЧПУ модели С-FBVSW-800 в сварном исполнении, получивший золотую медаль [3].

Расширение применения сварных конструкций выдвигает на первый план следующие вопросы: усовершенствование методов расчета сложных сварных базовых деталей; разработка рациональных конструктивно-технологических решений сварных базовых деталей на основе унификации и типизации их элементов, использование преимуществ сварного варианта изготовления и литейных технологий; исследование вариантов и разработка прогрессивных технологических приемов, позволяющих снизить трудоемкость, себестоимость, металлоемкость, повысить качество сварных соединений, обеспечить стабильность геометрических размеров сварных конструкций с ограниченным применением термообработки; исследование и разработка прогрессивных приемов и способов стабилизации размеров сварных базовых деталей взамен термообработки; исследование и разработка точных способов определения остаточных напряжений и сварочных деформаций.

## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ И МАШИН

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖЕСТКОСТИ И ДЕМПФИРУЮЩИХ СПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ И ЛИТЫХ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

В станинах металлорежущих станков материал работает при незначительных напряжениях, не превышающих, как правило, 100—150 кгс/см<sup>2</sup> [5]. Однако вследствие неравномерности распределения нагрузки и концентрации напряжений в отдельных узлах определя-

ютшее значение приобретают жесткость конструкции и ее виброустойчивость. Жесткость базовых деталей существенно влияет на стабильность процесса резания. Это особенно важно в связи со все возрастающим выпуском станков с ЧПУ, которые позволяют вести обработку на повышенных режимах.

Сварные конструкции обладают более высокой жесткостью при кручении и изгибе, чем литые, что положительно образом сказывается на производительности резания и точности обработки, как показали результаты ряда испытаний [26, 46]. Так, сравнительные динамические и статические исследования литой и сварной стоек тяжелого вертикально-фрезерного станка, проведенные в Ульяновском ГСКБ тяжелых и фрезерных станков [46], показали, что изгибная жесткость обеих стоек примерно одинакова, жесткость на кручение сварной стойки в пять—семь раз выше, чем литой; амплитудно-фазовые частотные характеристики имеют примерно одинаковый вид, однако у станка со сварной стойкой пик динамической податливости в 1,3 раза ниже, а степень демпфирования выше.

Комбинат Фритз Некерт (ГДР) совместно с Исследовательским центром станкостроения ГДР провел исследование статической и динамической жесткости литых и сварных станин фрезерного станка модели FKt500NC [7]. При этом было установлено, что при одинаковых внешних размерах сварной и литой станин деформация изгиба и кручения боковых стенок литой станины на 50% больше, чем сварной. Результаты исследования статической и динамической жесткости станины фрезерного станка модели FKt500NC при кручении относительно осей X, Y приведены в табл. 1.

Таблица 1

Конструкция	Статическая жесткость	Динамическая жесткость	Экономия металла
Литая	100%	100%	—
Сварная	183—260%	132—316%	До 20%

На Международном конгрессе по металлообработке, проводившемся в 1978 г. в г. Лейпциге, были приведены следующие сравнительные показатели, характеризующие литую и стальную станины горизонтально-фрезерного тяжелого станка модели ВГ190/4, изготовляемого в ГДР. В случае сварного исполнения станины достигается повышение статической жесткости на 50—70%, динамической жесткости на 200—400%, точности обработки на 20—50%; уменьшение массы составляет 25—30% [9].

Повышенная демпфирующая способность чугуна, определяемая формой, величиной и расположением графитных включений, считается его основным преимуществом по сравнению со сталью при производстве металлорежущих станков. Однако это преимущество

исчезает при сравнении сварных и литых конструкций. Демпфирующая способность сварных соединений намного больше, чем собственное демпфирование материала [10], так как зависит от формы и технологических факторов (типа шва, его расположения от носителя действующей нагрузки, способа сварки и т. д.) [7]. Прованализировав вибрაციонные характеристики станка в цепи «инструмент — обрабатываемый материал» (которые оказывают основное влияние на результаты процесса резания), японские специалисты пришли к выводу, что различие в материалах (сталь, чугун) не должно непосредственно сказываться на вибрационных характеристиках станка в целом [11]. Ведь более чем 90% виброгасящей способности определяется внешним трением на направляющих, в зорах, болтовых соединениях и других участках.

Однако плохая виброгасящая способность стали вредно сказывается на уровне шумов. В работе [11] приведены некоторые способы компенсации низкой виброгасящей способности стальных конструкций (в частности, применение в базовых деталях вместе со сталью материалов, повышающих внешнее трение; использование в качестве вибропоглопителя бетона; применение демпфирующих связей и др.).

В табл. 2 [11] показано влияние способа сварки на коэффициент затухания колебаний.

Т а б л и ц а 2

Образец	Коэффициент затухания колебаний, 10 <sup>3</sup>	Собственная частота колебаний, Гц	Статическая жесткость, кгс/мм
Чугунный	7,22	46,3	3,77
Сплошной образец из листовой стали	1,30	48,1	3,77
Из листовой стали, сваренный непрерывным швом	1,31	48,2	3,77
Из листовой стали, сваренный прерывистым швом	1,79 1,93 2,06	46,8 42,7 38,8	3,57 3,05 2,62
Из листовой стали, сварка по отверстиям	8,60	45,8	3,39

Из приведенных данных следует, что при применении необходимых конструктивных и технологических приемов, в частности, используя прерывистые швы вместо непрерывных для соединения несущих элементов (ребер, перегородок и др.), можно обеспечить коэффициент поглощения колебаний, равный или больший, чем у литых конструкций. Таким образом, результаты исследований [8, 10, 11, 26] свидетельствуют о том, что меньшая демпфирующая спо-

собность стали не оказывает отрицательного влияния на виброхарактеристику станка.

Работы, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона [10], показали, что в качестве материала сварных станин наиболее целесообразно использовать сталь ВСт. 3, которая обладает лучшей способностью гасить колебания и большей сопротивляемостью микропластическим деформациям, чем стали 35, Ст. 3пс или ВСт. 3сп; при этом, если масса наливленного металла не превышает 2% массы станины и швы расположены симметрично относительно нейтральной оси, можно отказаться от термообработки станин.

#### МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ИСПЫТАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для создания и расширения применения сварных базовых деталей с минимальной металлоемкостью необходимо точно определить их статические и динамические характеристики.

В настоящее время существует несколько путей расчета сварочных напряжений и деформаций: графоаналитические методы; аналитические методы с использованием теории упругости; численные методы с использованием аппарата теории пластичности; числовые методы с использованием теории упругости и пластичности; экспериментально-расчетные методы.

Методика проектирования стальных конструкций для металло-режущих станков до сих пор базируется не на аналитических методах, а на традиционных приемах и математическом аппарате, сложившихся в течение многих лет конструирования и эксплуатации литых конструкций. В их основе лежит требование обеспечения запаса прочности. Из-за отсутствия достоверных данных об опасных напряжениях и нормативных коэффициентах запаса прочности, однозначно определяющих их величину при расчете базовых деталей, нередко в узлах станков оказываются большие запасы прочности, тогда как вблизи концентраторов напряжений при рабочих нагрузках могут появиться напряжения, превышающие расчетные. Кроме того, применяются методы расчета по допускаемым напряжениям базируются на коэффициентах запаса прочности одинаковой величины для зон, претерпевающих сжатие и растяжение, хотя известно, что очаги разрушения возникают в зонах растягивающих напряжений. Поэтому целесообразно дифференцированное определение допускаемых напряжений.

Из всего вышесказанного вытекает необходимость разработки и практического использования более точных расчетных методов. В этом плане представляются весьма перспективными численные методы расчета с использованием теории упругости и пластичности, ориентированные на применение ЭВМ. Метод конечных элементов — один из наиболее универсальных методов теории упругости, позволяющий определять напряженно-деформированное состояние для областей практически любой формы с любыми граничными условиями и нагрузками. Идея метода заключается в том, что рас-

сматриваемая область представляется в виде совокупности конечного числа отдельных элементов. Наличие конечного числа узлов связей элементов дает возможность с помощью методов матричной алгебры проанализировать работу всего сооружения.

В МВТУ им. Баумана разработан способ воспроизведения на образце термомодеформационного цикла сварки, позволяющий определить характеристики сопротивления металлов деформированию с учетом влияния основных физических явлений, происходящих при сварке [13]. Для этой цели созданы установки с программированным нагревом и деформированием. Учет в численных методах расчетов сварочных деформаций и напряжений свойств металлов позволит существенно повысить точность расчетов.

Строгих практических рекомендаций по оценке точности приближенных решений метода конечных элементов в настоящее время нет. Однако для проведения такой оценки рекомендуется выполнять несколько решений с последовательным удвоением числа элементов. Если разность между соответствующими значениями (напряжением, деформацией) двух соседних приближений не превышает достаточной для практических целей точности, то это решение может быть принято для использования в инженерных расчетах. Даже при большом отклонении размеров соединения от области их определения при расчете по методу конечных элементов погрешность не превышает 30%, что допустимо при установлении выносливости сварных соединений [12]. А по данным работы [14], методом конечных элементов с помощью ЭВМ можно рассчитать термические и остаточные напряжения в свариваемых пластинах или профилях с точностью 5—10%.

На кафедре сварки МВТУ им. Баумана разработан экспериментально-расчетный метод определения временных деформаций и напряжений для случаев плоской деформации и плоского напряженного состояния. Результаты экспериментально-расчетных исследований имеют частный характер, связанный с необходимостью введения в расчет экспериментальных данных для рассматриваемого случая сварки. Это позволяет получать достоверные данные применительно к реальным сварным соединениям с учетом многообразия форм и размеров, конструктивных и технологических особенностей.

На кафедре сопротивления материалов Московского станконструментального института разработана методика расчета для многоосевных замкнутых контуров, использованная для определения жесткости станин глибокорасточных станков и станков токарного типа на Краматорском заводе тяжелого станкостроения им. В. Д. Чубаря [15]. Получены результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

Выбор наиболее рационального конструктивно-технологического решения сварных базовых деталей может быть осуществлен при исследовании напряженного состояния на моделях из низкомодульных оптически чувствительных материалов или стальных моделях.

В последнем случае количественная оценка напряженного состояния при нагружении, осуществляемом на стенде с учетом масштаба моделирования эксплуатационных нагрузок, и выбор оптимального варианта конструкции производятся тензометрированием геометрических моделей базовой детали [16]. Качественные и количественные связи между модельной и натурной конструкциями устанавливаются безразмерными критерияльными соотношениями по условиям силового и геометрического подобия, а также подобия режимов сварки. Для испытания натуральных образцов НПО «ЭНИМС» с участием Коломенского СПО и Московского станкостроительного завода «Красный пролетарий» им. А. И. Ефремова разработана методика, основанная на анализе спектра случайных колебаний, позволяющая оценить качество конструкции и отдельных узлов станков, в том числе со сварными базовыми деталями. Экспериментальные и аналитические исследования натуральных образцов станин тяжелых и уникальных станков проводятся Краматорским ЗТС совместно с Московским станконструментальным институтом [17]. В этих исследованиях используется один и тот же набор сварных элементов в различных комбинациях: меняются конструкция сварной детали, толщина стенок и другие параметры. Программа многократного «переваривания» и многовариантного исследования может быть заранее спланирована и построена так, чтобы различные варианты расчетных схем прошли всестороннюю экспериментальную проверку в кратчайшие сроки и при минимальных материальных затратах.

Достоверная информация о действительных нагрузках, условиях работы и надежности эксплуатируемых и создаваемых сварных конструкций может быть получена при использовании автоматических систем диагностирования и испытания сварных конструкций, а также средств вычислительной техники.

В ДПР создана система автоматического проектирования BASTA [8], дающая возможность получить достаточно точный прогноз ожидаемых статических, динамических и термических свойствах проектируемой станины и выбрать несколько оптимальных вариантов ее конструкции. Статические и динамические расчеты и определение размеров станин проводятся по программам, при которых станина представляется в виде балочной несущей конструкции или плоской несущей конструкции. Результаты расчетов по методу конечных элементов привели к конструктивным изменениям, в результате которых оказалось возможным уменьшить массу станины и на 12% повысить ее жесткость [9]. На первом этапе программа, основанная на «балочной» теории, предусматривает проведение расчета поперечного сечения, массы, момента инерции и линии, на которой лежит центр тяжести рассматриваемого элемента. Затем производится расчет коэффициента сдвиговых усилий, который зависит от формы поперечного сечения. На последней стадии расчетов устанавливается сопротивление сдвиговым усилиям

В местах приложения нагрузки. В результате можно определить зависимость деформаций от толщины стенки, на основании которой выбирается наиболее оптимальная толщина детали.

### ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

В настоящее время в СССР существует 440 наименований сварных базовых деталей. Более чем в 50% станков, проектируемых Одесским СКБ специальных станков, используются сварные базовые детали. Среди них: обдирочно-шлифовальные станки, ленточно-пильные станки, новые станки силового шлифования, токарно-винторезные станки классов Н и П и др.

В обдирочно-шлифовальных станках сварные детали составляют 80%. Для этой группы станков получена условная экономия металла в размере 20 т. В ПО «Тяжстанкогидропресс» (г. Новосибирск) станины, траверсы, цилиндры всех гидравлических прессов изготавлиются в сварном или лито-сварном исполнении. Все основные станки, работающие в тяжелых динамических условиях, выпускаются Минским ПО им. С. М. Кирова также со сварными базовыми деталями.

Особенно возрастает значение сварных конструкций при проектировании совершенно новых моделей станков и автоматических линий с ЧПУ. Однако низкий уровень технологии сварочного производства на станкостроительных заводах, дефицит стального проката, особенно листового и, наконец, недостаток опыта у конструкторов-станкостроителей (в результате чего не всегда удается получить рациональные сварные конструкции) сильно тормозят перевод базовых деталей на сварное исполнение.

В связи с этим основная задача, возникающая в процессе конструкторно-технологического проектирования, состоит в достижении минимальной металлоемкости базовой детали с обеспечением требуемой статической и динамической жесткости.

Опыт отечественного станкостроения и зарубежных фирм в области проектирования и изготовления сварных базовых деталей позволяет определить основные принципы выбора рациональных конструкторно-технологических решений, обеспечивающих необходимые жесткость и виброустойчивость [11, 17, 25, 26, 45, 48].

1. Наиболее экономичным является замкнутое коробчатое сечение. Однако возможны и другие решения. Некоторые зарубежные фирмы, а также заводы СССР применяют в токарных станках станины замкнутой треугольной формы (рис. 1). Примером такого решения является полуавтомат модели Б732 московского производственного объединения «Станкостроительный завод», а также станина плоскошлифовального станка английской фирмы Snow, отличающаяся высокой жесткостью. Сварная станина треугольного сечения приобретает устойчивость за счет крепления ее к колонке.

Стружка при этом падает в тару, не задерживаясь на плоскостях. Кроме основного назначения указанная станина используется в качестве масляного бака. Это увеличивает поверхность охлаждения и обеспечивает одинаковую температуру по всему станку (см. рис. 1).

При значительной ширине базовой детали может быть выбрана арочная конструкция из двух или нескольких треугольных блоков. Треугольные формы полтарок достаточно жестки без дополнительных перегородок. Главная особенность подобных конструкций — малое количество швов (рис. 2).

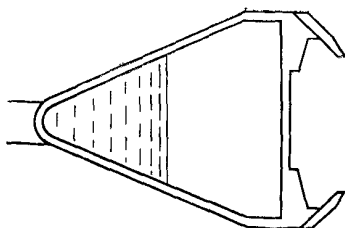


Рис. 1. Поперечное сечение сварной станины плоскошлифовального станка фирмы Snow

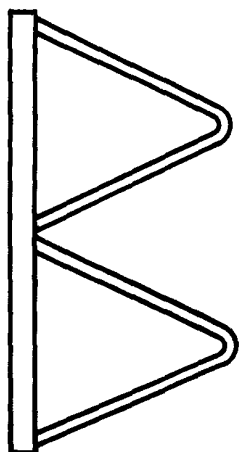


Рис. 2. Сварная станина арочной конструкции

Конструирование сварных базовых деталей из профильного проката позволяет получить значительно изгибную и крутильную жесткость. Примером может служить конструкция сварной поперечины уникального карусельного станка — четыре трубы, сваренные между собой по длине полосомами, образуют прямоугольный внешний контур. Характерная особенность данной конструкции — сравнительно небольшая масса и высокая несущая способность. Варианты такой конструкции используют в своих моделях фирмы ФРГ и Франции. В конструкции координатно-расточного станка, разработанной фирмой Sankok (Япония), применяются стальные трубы большого диаметра, полость которых залита бетоном. Помимо обеспечения жесткости такое решение позволяет справиться с проблемами вибрации и шумов.

Возможно применение **комбинированных форм** (сочетание швеллеров с прямоугольными коробками). Использование в качестве конструктивных элементов сварных базовых деталей тавровых и коробчатых элементов открывает широкие возможности для применения гнутых и гнutoсварных профилей. Несущая способность и жесткость гнутых профилей выше, чем у сваренных из листового

проката и горячекатаных (при равных площадях поперечного сечения). Кроме того, их использование позволяет уменьшить длину сварных швов, что благоприятно сказывается на стабильности размеров конструкции в процессе эксплуатации. Замкнутые профили имеют высокую сопротивляемость усилиям скручивания, а узлы, состоящие из продольных и поперечных швеллеров, обладают высокими показателями жесткости. Для повышения жесткости открытых профилей к концам их приваривают планки, которые значительно увеличивают несущую способность сварных узлов. В работе [48] приведен сортмент профилей проката, рекомендуемых для применения в конструкциях сварных базовых деталей.

За рубежом в сварных конструкциях станков широко используются вальцованные холоднокатаные профили прямоугольного сечения размерами  $400 \times 400 \times 12,5$  мм и горячекатаные — размерами  $450 \times 250 \times 16$  мм [23].

2. Конструкция базовой детали должна состоять из минимального количества сварных элементов (даже за счет некоторого увеличения их толщины и жесткости). Повсеместно, где это не обусловлено прямым расчетом, необходимо исключать мелкие ребра, косынки, перемычки, изготовление которых требует значительного объема механической обработки, а приварка повышает уровень термических деформаций. Следует отметить при этом, что масса сварной детали в наибольшей степени зависит от правильного конструирования поперечного сечения основных балок станины.

3. Для уменьшения сварочных напряжений необходимо стремиться к симметричному исполнению конструкции. Следует установить рациональную последовательность выполнения сварных швов; их количество и длина должны быть минимальны. Рекомендуется использовать конструктивные элементы стыковых и угловых сварных соединений с уменьшенными углами скоса кромок (до  $20^\circ$ ). Применение двусторонней сварки соединений с разделкой кромок в большинстве случаев позволяет получить меньшее количество наплавленного металла, чем односторонняя сварка с разделкой. Однако двусторонняя сварка не всегда возможна из-за конструктивных особенностей базовых деталей. В этом случае предпочтение следует отдать односторонней сварке без разделки кромок.

4. Повышение статической и динамической жесткости достигается за счет увеличения общей поверхности ребер. Исследования [49] показали, что наиболее эффективно применение диагональных ребер, так как они препятствуют искажению поперечного сечения и при небольшом увеличении массы жесткость значительно возрастает. Данные, приведенные в работе [49], свидетельствуют о том, что применение подбных ребер обеспечивает повышение жесткости на изгиб и кручение в большей степени, чем утолщение стенок.

В конструкции коробчатой сварной поперечины, разработанной в Центральном институте сварки ГДР и представляющей собой унифицированный узел типа ZIS 995 длиной 2800 мм, используются приваренные по диагонали к боковым стенкам прямоугольные или

трапециевидные ребра, связанные между собой продольными перемычками из уголкового профиля или из труб. В результате проведенных расчетов и испытаний модели поперечины в натуральную величину установлено, что подобная конструкция обладает повышенной жесткостью против вибрационных нагрузок [47].

Для уменьшения местных деформаций в зоне крепления станины необходимо введение достаточно высоких ребер или косынок, соединяющих фланцы с основными стенками. Наибольший эффект обеспечивается при расположении ребер в непосредственной близости к осям крепежных винтов [50, 51].

Ребра жесткости в сварных деталях рекомендуется устанавливать на расстоянии, составляющем 0,7 расстояния между ребрами в литых базовых деталях (в США принято соотношение 0,5—0,6).

В результате расчета жесткости сварных оснований и стойки обрабатывающего центра, изготовляемого в ГДР [8], найдено, что оптимальная толщина ребер жесткости равна 10 мм, расстояние между ними — 350—500 мм, а наименьшая толщина стенки раскрасиваемых базовых деталей составляет 15 мм.

Исследования, проведенные в Одесском СКБ специальных станков, позволили определить, что у шпиндельного станка модели ВШ-750 при нагрузке на станину 10 тс расстояние между ребрами жесткости станины может составлять 820 мм, а толщина ребер — 16 мм.

По данным Ульяновского ГСКБ ФС [46], толщина основания стойки тяжелого вертикально-фрезерного станка модели 654 должна быть не менее 30 мм при толщине боковых стенок 10—12 мм.

Так как с увеличением количества элементов сварной конструкции возрастает ее конструктивная и технологическая сложность, необходимо стремиться к рациональному расчленению крупногабаритных конструкций на отдельные технологически завершенные сварные узлы. В этом плане представляется перспективным **блочный метод** проектирования и производства сварных базовых деталей, при котором отдельные жесткие узлы-блоки простого коробчатого сечения свариваются при помощи заранее подготовленных блоков-перемычек [7]. Расчленение крупной корпусной детали на отдельные свариваемые блоки позволяет осуществлять параллельное изготовление отдельных секций и таким образом сократить общий цикл производства; полностью ликвидировать процесс сварки отдельных блоков простого коробчатого сечения; свести до минимума тепловые деформации при сварке, так как протяженность соединенийных швов (и, следовательно, нагрев) незначительна и все блоки до окончательной сварки могут быть собраны на общей стеновой плите и совмещены зеркалом направляющих в одной плоскости; достичь высокой степени унификации блочных конструкций сварных базовых деталей.

В результате исследований, проведенных на Краматорском заводе тяжелого станкостроения, установлено, что жесткость при кручении блоков сварных станин замкнутого профиля в первом при-



ближении прямо пропорциональна толщине вертикальных стенок; поперечные связи замкнутого (прямоугольного) сечения между блоками станины примерно втрое увеличивают суммарную крутильную жесткость отдельных блоков, а поперечные связи открытого (Π-образного) сечения на суммарной жесткости почти не сказываются; количество и расположение поперечных переродок и ребер внутри блоков на их крутильную жесткость не влияют. При этом были выявлены определенные ограничения: предпочтительная длина — не выше 6 м, ширина секций определяется пределами размеров станка [15].

Результаты исследований позволили внедрить сварную конструкцию станины глубокорасстоячного станка модели КЖ-1910 с тремя — пятью секциями в серийное производство на Краматорском заводе тяжелого станкостроения. Другим характерным примером является станина специального горизонтально-сверлильного станка модели КЖ-2901.02, которая состоит из двух секций, стыкуемых по длине.

В ПО «Гяжстанкомгидропресс» [27] аналогичным образом из группы секций изготавливается сварная часть стойки горизонтально-расстоячного станка модели 2Г660СФ2. Благодаря поперечному секционному делению можно с минимальными затратами получить деталь для перемещения шпиндельной бабки различной длины.

Работы по созданию сварных конструкций станков модульной конструкции ведутся в ГДР на предприятии Fritz Неккет (г. Карл-Маркс-Штадт). В частности, на этих принципах создаются новая гамма фрезерных станков одно- и двухстоечного типа [74] и обрабатывающий центр С-ГБSSW-800 с ЧПУ. Стойка обрабатывающего центра изготавливается из нескольких основных сварных модулей, которые, как правило, представляют собой рамные конструкции корычатой формы. Модули скрепляются болтами, образуя, таким образом, нужную конфигурацию (рис. 3).

Об эффективности модульного принципа конструирования свидетельствует тот факт, что из 2500 фрезерных станков, выпускаемых ежегодно на комбинате Fritz Неккет, 700 переведены на сварное исполнение. Проводятся работы по оптимизации конструкции сварочных модулей для их массового производства. Оработка конструкции осуществляется в исследовательском центре комбината с помощью ЭВМ, которая разрабатывает теоретическую модель конструкции, представляемую на дисплее, непосредственно связанным с компьютером.

Рациональное конструирование сварных базовых деталей позволяет производить автоматическую сварку их и облепить процесс изготовления. Так, в ГДР предложен способ сборки и сварки корпусов и станин, имеющих корычатую форму, собираемых из отдельных листовых деталей и свариваемых затем угловыми швами. На главной листовой детали, представляющей собой развертку оснóвания станины и ее стенок, укладываемую на специальное приспособление, устанавливаются и фиксируются в вертикальном по-

ложении внутренние ребра жесткости будуще го узла, после чего они привариваются автоматом к основанию угловыми швами. Затем главную листовую деталь сгибают под прямыми углами в том же приспособлении, и ребра жесткости приваривают окончательно к образовавшимся боковым стенкам. В результате получается жесткая корычатая конструкция [73, 106].

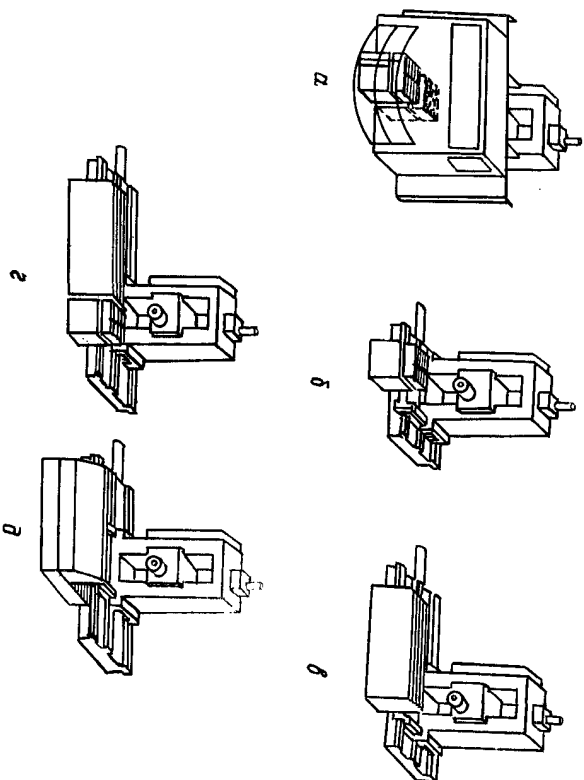


Рис. 3. Примеры типовых конструкций обрабатывающего центра типа С-ГБSSW-800 со сварными модулями и различной компоновкой рабочих столов:  
 а — поворотный рабочий стол со сменной кассетой и защитным экраном; б — поворотный рабочий стол без кассеты; в — неподвижный рабочий стол; г — неподвижный рабочий стол + вращающийся рабочий стол; д — неподвижный рабочий стол + угловый пульт

В Англии разработана программа ASP (автоматизированное мелкосерийное производство), с помощью которой производится исследование станкостроительных конструкций, в частности изучаются болтовые способы соединения сварных модулей [4], образующих конструкции базовых деталей той или иной конфигурации.

Применение блочного метода проектирования создает предпосылки для унификации сварных конструкций базовых деталей. Станины станков различных типоразмеров можно компоновать из отдельных унифицированных блок-секций стандартного поперечного сечения и стандартной длины и сваривать попарно (или по 3 и 4 блока) поперечными перемычками (тоже стандартного ряда) [17]. Унификация сварных конструкций непосредственно связана с их классификацией и разработкой системы кодирования геометрии-

ческих и технологических характеристик. Имеющиеся в настоящее время в СССР классификации сварных конструкций носят, как правило, отраслевой характер. В ГДР на основе действующих стандартов и отраслевых норматив составлен сводный каталог типовых сварных соединений, применяемых в машиностроении и строительстве, что дает возможность использовать современные средства числительной техники при проектировании сварных металлоконструкций [28]. В работе [29] предлагается система классификации, состоящая из самостоятельных подсистем для сварных конструкций и универсально-сборных приспособлений. Причем изменения в одной подсистеме неизбежно вызывают изменения в другой. Конструктивно-технологическое подобие, положенное в основу классификации, позволяет оптимизировать состав комплектов УПС и обеспечить внедрение в сварочное производство прогрессивных и экономически целесообразных методов изготовления сварных конструкций.

Унификация сварных конструкций базовых деталей позволит перейти к их серийному производству. Поскольку увеличение объема выпуска способствует снижению совокупных затрат и уменьшению трудоемкости изготовления сварных конструкций на 50—60%, то повышение уровня специализации и концентрации при серийном производстве является важным фактором эффективности перевода с литого на сварное исполнение.

Для максимального использования всех преимуществ серийного производства сварных конструкций необходимо детально планировать весь производственный процесс. На станкостроительном заводе фирмы Непман Трауб Maschinenfabrik (ФРГ) [26] все отдельные детали, объединяемые в подгруппы или группы, выпускаются оптимальными партиями независимо от количества изготавливаемых станин в месяц. При этом рациональное распределение последовательности операций производится с помощью программы-графика, охватывающей всю сферу производства. Это позволяет рационально использовать производственные мощности и обеспечить кратчайшие переходы между отдельными операциями.

### ПРОГРЕССИВНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ, ПОЗВОЛЯЮЩИЕ СНИЗИТЬ ДЕФОРМАЦИЮ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Анализ информационных потоков за последние годы, проведенный в ИЭС им. Е. О. Патона, свидетельствует о росте количества публикаций, касающихся новых высокопроизводительных процессов, в том числе дуговой сварки с увеличенным выходом электрода, способом сварки порошковой проволокой и т. д. Наблюдается значительное повышение патентной активности в области электрошлаковой сварки, что обусловлено расширением применения этого способа, в частности при производстве крупногабаритных конструкций

из элементов толщиной более 40 мм [30, 31]. Сварочная технология развивается в направлении применения сварки без разделки кромок (что позволяет сэкономить до 15% трудозатрат), а также сварки «по узкому зазору», обеспечивающей снижение сварочных деформаций вследствие уменьшения количества наплавленного металла и тепловложения [31].

Интенсивно разрабатываются способы сварки с высокой плотностью энергии: электроннолучевая, лазерная и лазерная, в том числе для соединения крупногабаритных элементов [6, 30].

#### СВАРКА В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

Сварка в углекислом газе является одним из ведущих процессов в отрасли. Основные проблемы, обуславливающие совершенствование этого способа сварки, заключаются в снижении остаточных сварочных деформаций, улучшении формообразовании шва и получении бездефектных сварных соединений, разработке мероприятий, устраняющих повышенное разбрызгивание.

С целью снижения деформаций в ИЭС им. Е. О. Патона разработана электродуговая проволока на основе Si—Mn—Zr, позволяющая проводить сварку на прямой полярности в среде углекислого газа. По сравнению со сваркой на обратной полярности коэффициент наплавки увеличивается на 25—30%, повышается стойкость против кристаллизационных трещин вследствие меньшего перехода примесей из основного металла в шов, а угловые сварочные деформации снижаются на 35—40% [32].

Применение переменного тока повышенной частоты для питания дуги при сварке в углекислом газе позволяет использовать более простое и дешевое оборудование. Однако попытки вести сварку на переменном токе не имели успеха из-за низкой стабильности процесса. В работе [33] сообщается о разработке способа сварки активированной проволокой на переменном токе, обеспечивающего высокую стабильность процесса. При этом устраняется явление магнитного дутья, а потери металла на разбрызгивание снижаются до 4—6% при удовлетворительной форме шва.

Все большее распространение получает сварка в смесях защитных газов. Защитная среда, определяя форму дуги, оказывает влияние на склонность металла шва к образованию пор. Швы, выполненные при сварке в смеси  $CO_2 + 20\% O_2$  (при токе до 500 А и скорости сварки до 70 м/ч), не имеют дефектов пористости. Наименьшие потери на разбрызгивание достигаются при использовании проволоки диаметром 1,4 мм и вылете электрода  $\leq 25$  мм [34]. Кроме того, при сварке в защитном газе такого состава улучшаются горение дуги и форма шва, увеличиваются производительность наплавки и глубина проплавления.

За рубежом в качестве защитной среды при сварке сталей в большинстве случаев применяют смесь аргона (80%) с углекислым газом. При этом помимо повышения механических свойств углыша-



ется процесс переноса расплавленного электродного металла в сварочную ванну, который приближается к струйному, характеризирующемуся минимальным разбрызгиванием металла.

Использование смесей состава  $Ar + (15-30\%) CO_2 + (3-5\%) O_2$  или  $Ar + (15-20\%) CO_2$  дает максимальный технико-экономический эффект при сварке на форсированных режимах (сварочный ток—400—650 А) и при сварке соединений, которые по техническим причинам не должны иметь приварившихся брызг [35].

Для повышения качества сварных швов применяется сварка в защитных газах с попережным или продольным колебанием электрода. По данным работы [18], продольные колебания обеспечивают более высокую эффективность процесса сварки по сравнению с попережными вследствие значительного измельчения зерна металла шва. Сварка этим способом способствует интенсивному перемещению металла сварочной ванны, а также получению большого объема жидкого металла, что создает благоприятные условия для выхода газа и способствует уменьшению пористости. Этот метод экономичнее традиционной многослойной сварки, так как уменьшается расход электродного металла и сокращается время сварки.

В Японии разработан способ дуговой сварки в защитных газах, при котором предотвращается образование подрезов за счет регулирования формы сварочной ванны дополнительной струей защитного газа, направляемой под давлением в ее хвостовую часть [36]. Благодаря этому жидкий металл, перемещаясь вперед, заполняет весь объем сварочной ванны и формирует нормальное усиление шва. В США при сварке горизонтальных угловых швов для устранения подрезов и пористости предложен способ, заключающийся в попеременной подаче двух электродных проволок в зону сварки. Одна из проволок направлена на вертикальный, другая — на горизонтальный элемент. Это дает возможность сваривать материалы с защитным покрытием [37].

Повышение производительности при дуговой сварке в защитных газах многослойных швов обеспечивается благодаря применению многоэлектродных систем.

В США предложен способ многоэлектродной дуговой сварки в защитных газах, заключающийся в том, что для обеспечения одинакового химического состава и механических свойств по всему сечению шва каждый слой выплавляется электродом (или группой электродов) различного химического состава [8]. Другой способ многоэлектродной сварки [39] отличается тем, что при наплавке каждого последующего слоя регулируется объемная доля содержания активного газа в защитной смеси в зависимости от состава электродной проволоки. В результате обеспечивается равномерность свойств наплавленного металла в зоне сварки.

Для сварки листов толщиной 16—30 мм японские специалисты предлагают трехэлектродную схему сварочного процесса. Первые две дуги от проволочных электродов диаметром 1,8 мм имеют двойную газозащитную среду: 1) 85%  $Ar + 15\% CO_2$ ; 2) 50%  $Ar + 50\%$

$CO_2$ . Третья дуга от ленточного электрода сечением 1,25×15 мм горит под слоем флюса. Испытания промышленной установки такого типа показали положительные результаты [40].

Одно из эффективных средств борьбы с разбрызгиванием металла — применение специальных электротехнических устройств. В Челябинском политехническом институте [41] предложен способ сварки с короткими замыканиями дугового промежутка, при котором с помощью специального устройства осуществляется кратковременное снижение тока к моменту разрыва промежутка. Это значительно уменьшает вероятность выброса капли за пределы шва.

Снизить разбрызгивание металла в два-три раза можно также путем оптимизации соотношения между сварочным током и напряжением. Для этой цели создано устройство [42], позволяющее осуществлять оптимальное регулирование параметров процесса сварки. Сварщик задает лишь силу сварочного тока, устанавливая соответствующую скорость подачи электродной проволоки, а напряжение на дуге определяет система оптимизации.

В Японии разработан способ предотвращения прилипания брызг металла к свариваемым деталям, при котором к деталям прикладывают высокочастотные колебания с частотой более 10 кГц. Эти колебания передаются брызгами металла, в результате чего они «скачут» по поверхности и застывают, не успевая прилипнуть к поверхности [43].

#### СВАРКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Сварку порошковой проволокой можно осуществлять во всех пространственных положениях. Механические свойства сварных соединений получаются значительно выше, чем при ручной дуговой сварке. При скорости сварки до 30 м/ч разбрызгивание практически отсутствует. При сварке в смеси  $CO_2 + Ar$  значительно снижается выделение дыма [44, 39].

Применение при сварке с газовой защитой порошковых проволок, в состав которых кроме флюса входит железный порошок, позволяет в два-три раза повысить производительность наплавки по сравнению со сваркой штучными электродами. Пониженное содержание в проволоке диффузионно способного водорода предотвращает появление трещин и на 50°С снижает температуру предвартельного подгрева изделий из низкоуглеродистой стали большой толщины. Коэффициент перехода электродного металла в шов достигает 95% [39, 44].

За рубежом распространены способ сварки порошковой проволокой (FCAW) без дополнительной газовой защиты. Существенное увеличение производительности наплавки достигается при использовании повышенных значений тока, сравнительно небольшого диаметра проволоки и увеличения вылета электрода. При этом уменьшаются размеры зоны термического влияния, что приводит к снижению сварочных деформаций. По производительности способ

РСАУ успешно конкурирует со сваркой под флюсом и способен заменить ее в случае, когда применение сварки под флюсом невозможно, а сварка покрытыми электродами экономически невыгодна [55]. Применение сварки порошковой проволокой позволяет решить ряд проблем, возникающих при сварке под флюсом [53]. Уменьшается тепловложение и снижается возможность образования трещин при сварке первых слоев многопроходного шва в результате уменьшения глубины проплавления при той же производительности наплавки [54].

Сварка порошковой проволокой наиболее развитые получила в США, где соотношение производства сплошной и порошковой проволоки составляет 2:3. В последнее время в сварочном производстве на постоянном токе наблюдается тенденция перехода от проволоки большого диаметра к проволоке малого диаметра, причем в основном применяется проволока диаметром менее 1,6 мм с рутильовым покрытием [56].

Вильноским филиалом ЭНИМСа был разработан технологический процесс сварки базовых элементов конструкций координатно-измерительных машин высокой точности (в том числе особо ответственных оснований колонн). По опыту изготовления аналогичных корпусных конструкций координатно-измерительных машин в сварном исполнении такими зарубежными фирмами, как Wendix и Brown and Sharr (США), использовалась полуавтоматическая сварка порошковой проволокой рутильового типа марки ПП-АН8 диаметром 2,2 мм в защитной смеси углекислого газа и аргона. После сварки и последующей обработки деформации конструкции находились в пределах нормативных данных для подобных особо ответственных конструкций [72].

Широкое промышленное применение этого перспективного способа сварки в СССР сдерживается ограниченными мощностями производства порошковой проволоки, а также относительно высокой стоимостью ее по сравнению со стоимостью распространённой проволоки марки Св08Г2С. В настоящее время в рамках СЭВ проводится работа по созданию в странах—членах СЭВ материально-технической базы для производства разрабатываемых в ИЭС им. Е. О. Патона порошковых проволок и применению данного процесса в промышленном масштабе. Можно предположить, что в скором времени сварка порошковой проволокой получит более широкое распространение в станко- и прессостроении.

#### СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Задачи повышения производительности и качества сварных соединений при сварке под флюсом решаются путем все более широкого распространения способов сварки с увеличенным вылетом электрода, подогревом электрода, пульсирующей дугой, применения многоэлектродных систем и т. д.

Способ сварки с предварительным подогревом электрода, предложенный в Гданьском политехническом институте, позволяет повысить производительность по сравнению с традиционным способом на 40—60% и дает возможность выполнять сварные соединения с меньшим количеством слоев при одинаковых параметрах сварки или с таким же количеством слоев, но с большей скоростью за счет увеличения глубины проплавления на 5—10%. При этом уменьшается ширина и увеличивается усиление шва [57].

Перспективным способом снижения деформации при сваривании длинных швов является сварка дуговыми электродами. Этот процесс резко увеличивает скорость сварки, обеспечивая высокие механические свойства металла шва (электроды расположены вдоль оси шва) [58], и может быть рекомендован для изготовления ответственных сварных конструкций.

Сварка тремя электродными проволоками листов толщиной 25 мм позволяет повысить скорость сварки на 25% по сравнению с обычным способом. К недостаткам методам относится необходимость высокоточной подготовки кромок. Трехэлектродная сварка под флюсом обеспечивает высокую производительность процесса при односторонней сварке плоских панелей большой толщины с применением специальных подкладных устройств, служащих для формирования обратного валика шва [59].

Способ сварки стыковых соединений пульсирующей дугой, разработанный в ВПКТИатомкоммаше, уменьшает тепловложение в основной металл, позволяет снизить риск появления подрезов в стенках разделки и улучшает отделимость шлаковой корки. При этом пульсация электрических параметров режима обеспечивается программированием периодичности подачи проволоки с заданной продолжительностью периодов подачи и пауз между ними. Регулируя параметры импульсов тока, можно управлять условиями формирования сварочной ванны, изменяя внешнюю поверхность шва от выпуклой до вогнутой [60].

В Воронежском политехническом институте для улучшения качества и снижения металлоемкости тяжелонагруженных сварных узлов прессов разработан способ сварки под флюсом ленточным электродом стыковых соединений толщиной 16 и 20 мм и многопроходных соединений толщиной 40 мм на скоростях, вдвое превышающих скорости сварки традиционных заводских режимов. Реализация таких форсированных режимов осуществляется с применением мощных сварочных выпрямителей типов ВДМ-1600 и ВДН-3001.

#### ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

Электрошлаковая сварка — наиболее производительный способ получения сварных соединений больших толщин, выполняемых за один проход практически без пор и шлаковых включений. Однако большое тепловложение приводит к развитию поперечных сварочных деформаций и острых напряжений. Металл шва характер-

ризуется значительной анизотропией свойств, крупнозернистой структурой, низкой ударной вязкостью, пониженной сопротивляемостью к хрупким разрушениям. Необходимость применения термомообработки для улучшения свойств сварных соединений ограничивает возможность этого способа [61].

В Японии для снижения остаточных напряжений разработан способ электрошлаковой сварки пластин, при котором одной из пластин сообщается предварительный обратный прогиб. Для уравнивания напряжений, возникающих при сварке, поддержания постоянного зазора между крошками и регулирование величины усадки пластину с прогибом в процессе сварки поджимают с внешней стороны к другой пластине при помощи специальных домкратов с фиксаторами [62].

В нефтехимическом машиностроении СССР успешно применяется способ электрошлаковой сварки углеродистых и низколегированных сталей толщиной до 60 мм с регулированием термических циклов. Способ предусматривает сопутствующее охлаждение металла шва и зоны термического воздействия водо-воздушной смесью.

В ДРР разработан способ электрошлаковой сварки ленточным электродом на повышенных токах [63]. Зазор между соединяемыми крошками может быть уменьшен до 15 мм для деталей толщиной 70 мм. Получаемые таким образом соединения лишены дефектов и обладают ударной вязкостью в 1,5 раза большей, чем у соединений, выполненных проволочным электродом. Производительность плавления повышается в три раза, а скорость сварки — в девять раз по сравнению со сваркой проволочным электродом. Благодаря увеличению скорости сварки уменьшается ширина крупнозернистой области в зоне термического влияния, а сварной шов отличается более мелкозернистой структурой.

Из работы [64] следует, что наибольшая производительность и скорость достигаются при электрошлаковой сварке двойной электродной проволокой на больших токах с добавлением в сварочную ванну металлического порошка. При этом улучшается структура сварного соединения и повышается ударная вязкость. Во избежание образования горячих трещин или несплошностей в центре шва необходимо обеспечить непрерывную подачу металлического порошка в количестве, равном примерно 140% от массы расплавленного электрода. Этот способ применяется для сварки листов толщиной 40—90 мм.

Как видно из вышеизложенного, форсированные режимы электрошлаковой сварки способствуют повышению качества сварного соединения. К недостаткам таких режимов относятся образование глубокого кратера в металлической ванне под электродом, что ведет к росту кристаллитов сварного шва. Нахождение продольно-радиального магнитного поля изменяет форму и глубину сварочной ванны и обеспечивает возможность сварки без снижения качества шва [65].

Тенденция к увеличению габарита сварных металлоконструкций и проблема повышения точности их изготовления обуславливают поиски путей повышения эффективности сварочных процессов, обеспечивающих снижение себестоимости при сохранении высокого качества сварных соединений.

Процесс сварки с узкощелевой разделкой кромок для деталей толщиной 20—300 мм приобретает все большее значение вследствие значительного снижения количества наплавленного металла и уменьшения трудоемкости подготовки кромок. Важным преимуществом этого процесса является сокращение тепловыделения при сварке, что повышает качество швов и уменьшает остаточные сварочные деформации. Сварка толстостенных деталей с низким удельным тепловыделением позволяет обойтись без дорогостоящей термомообработки, применяемой для снятия напряжений. Благодаря экономии наплавленного металла расходы могут быть снижены почти на 50% в зависимости от области применения и свариваемых толщин [66].

Существует несколько способов сварки швов с узкощелевой подготовкой кромок: одной прямой электродной проволокой большого диаметра (2 или 3,2 мм), расположенной по центру зазора; двумя тонкими электродами (диаметром 1,2 или 1,6 мм); крученым электродом.

В первом случае разделка полностью заполняется по ширине в каждом проходе. Основная проблема при осуществлении этого способа заключается в необходимости введения в сварочную ванну значительного количества тепла для получения большого объема расплавленного металла, чтобы исключить подрезы и шлаковые включения. Сварка в импульсном режиме позволяет существенно снизить количество дефектов [66, 67].

При сварке двумя электродами, характеризующейся низким тепловыделением, в зазор вводятся две следующие друг за другом плоские торелки с токоведущими проволоками, каждая из которых направляется на торцовые поверхности свариваемых кромок в зазоре под углом к вертикальной оси. При этом образуется слой наплавленного металла из двух смежных тонких валиков. Весь процесс сварки требует многократных проходов с подъемом сварочных головок после каждого прохода. Применение отогнутых к основанию зазора проволочек позволяет расширить диапазон свариваемых этим способом толщин и обеспечивает более полное проплавление свариваемых кромок.

Колесания дуги в зазоре при описанных способах узкощелевой сварки достигаются либо путем перемещения торелки в зазоре, либо путем колесания электродной проволоки при фиксированном положении торелки. Применение первого способа ограничено толщинами до 100 мм, а вторая схема допускает сварку любых толщин [66].

При сварке крученым электродом по мере его расплавления дуга получает непрерывное вращательное движение. Считается, что фактический вылет крученого электрода за счет спиральности больше, чем у одинарной прямой электродной проволоки при одинаковой продолжительности включения тока и поддержки в обоих случаях постоянного расстояния между концом плавящегося электрода и основным металлом. Поэтому растет выделение тепла, и скорость плавления увеличивается. При сварке в смеси защитных газов ( $Ar+20\% CO_2$ ) скорость плавления крученым электродом на 10% больше, чем обычной проволокой [39]. При этом спобе устраняются некачественное формирование нижней части шва и несплавление с боковыми стенками разделки, значительно уменьшается количество пор.

Узкощелевая разделка кромок может применяться при сварке в защитных газах, под флюсом, при электрошлаковой сварке. Причем при электрошлаковой сварке площадь разделки кромок может быть снижена до  $1/3$  от площади разделки при обычном спобе сварки [68].

#### **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОЛУЧЕВОЙ СВАРКИ**

Электроннолучевая сварка в связи с созданием быстроточащих камер большой вместимости и установок с местным вакуумированием находит все более широкое распространение, в том числе для сварки крупногабаритных изделий, несмотря на значительную первоначальную стоимость оборудования [69]. Процесс характеризуется высокой проплавленной способностью и может применяться для весьма ответственных изделий. При сварке листов толщиной 200 мм использованите электроннолучевой пучок мощностью 100 кВт по сравнению с многопроходной сваркой под флюсом дает сужение в 40 раз зоны сварного соединения, значителное снижение и равномерное распределение остаточных напряжений, увеличение скорости сварки в 100 раз, создает возможность ведения процесса сварки без присадочного металла. Сварка на таких установках стальных соединений толщиной 90 мм позволяет на 50% экономить потребление энергии по сравнению со способом сварки в глубокую разделку, а при сварке стальных соединений толщиной 200 мм затрачивается только 20% энергии, потребляемой при сварке под флюсом [70]. Основными путями получения бездефектных швов толстоственных (до 100 мм) деталей являются: изменение электронного пучка с малой угловой расходимостью и максимально возможным током; сварка на малых скоростях и соответственно пониженной мощности; колебание дуга в плоскости, перпендикулярной его оси; модуляция тока дуга [71].

Совершенствование схем электроннолучевых пучков привело к разработке установок для сварки деталей без создания вакуумного пространства. Особенностью таких пучков является наличие на выходе электронного луча специальной камеры, в которую посту-

пает гелий в количестве до 70 л/мин. При прохождении через выходное отверстие гелий разогревается за счет тепла электронного луча и, выходя с ним в виде плазменной струи, расплавляет кромки соединяемых деталей [40].

Широкое применение электроннолучевой сварки ограничивается в настоящее время слишком высокой стоимостью установок и определенными сложностями в осуществлении технологических процессов этого вида сварки.

#### **ВИБРООБРАБОТКА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В последнее время все шире распространяется способ снижения остаточных напряжений с помощью воздействия энергии механических вибрационных колебаний.

Сварочные напряжения релаксируются в результате суммирования остаточных и циклических переменных напряжений. В момент совпадения по знаку вибрационных и остаточных напряжений происходит кратковременная перегрузка сварных соединений, вызывая в них пластические деформации — прежде всего в участках концентрации напряжений. Необходимым условием является достижение предела текучести [75—78].

Метод виброобработки может быть применен для широкого класса конструкций. К другим преимуществам (по сравнению с термообработкой) этого метода относятся: возможность одновременного уменьшения деформаций и напряжений; отсутствие местного термического воздействия, зачастую приводящего к снижению механических характеристик сварной конструкции; уменьшение затрат энергии, стоимости оборудования и времени обработки.

Виброобработка особенно эффективна, когда термические и другие способы снятия напряжений неприменимы для конкретной конструкции, например при наличии приваренных направляющих, закаленных индукционными способом после сварки. В таких случаях в мировой практике станко- и приборостроения широко применяется виброобработка для снятия и стабилизации остаточных напряжений [79].

Однако в настоящее время не существует еще единой точки зрения на механизм процесса виброобработки и эффективность его применения для сварных конструкций. Этим, а также недостатком поршневого и достаточно мощного оборудования, очевидно, объясняется слабое развитие этого способа в СССР. Отсюда вытекает необходимость дальнейшего исследования процесса виброобработки, разработки и широкого внедрения соответствующего виброоборудования, а также отработки методики проведения процесса.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРООБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Основные параметры вибростабилизации — частота, величина вибрационных напряжений (или амплитуда вибрации) и продолжительность вибронапряжения. О влиянии этих параметров на эффективность виброобработки высказываются противоречивые мнения. Так, в работе [80] проводились исследования влияния числа циклов нагружения на образцах из углеродистой стали размерами  $36 \times 56$  мм с остаточными напряжениями, вызванными наплавкой продольного валика. Образцы подвергались пульсирующим напряжениям, вызывавшим растяжение валика при  $\sigma_{\max} = 12,8$  кгс/мм<sup>2</sup> и  $\sigma_{\min} = 0,56$  кгс/мм<sup>2</sup>. При этом максимальные остаточные напряжения уменьшились с 24 до 20 кгс/мм<sup>2</sup> после  $5 \times 10^5$  циклов нагружения и до 5 кгс/мм<sup>2</sup> после  $6,2 \times 10^6$  циклов. Эти данные говорят о решающем влиянии количества циклов на ликвидацию остаточных напряжений. В результате других исследований [75, 76, 81] выявлено, что снижение остаточных напряжений при резонансе происходит с большей скоростью и основная часть напряжений снимается в течение первых трех минут.

Для получения эффекта правки можно ограничиться числом циклов нагружения, не сильно превышающим число циклов, соответствующих возникновению устойчивых амплитуд резонансных колебаний, что связано с появлением значительных макропластических деформаций на неустановившемся режиме виброосиловый обработки [82]. В частности, для низкоуглеродистой стали основное уменьшение остаточных напряжений происходит после  $3 \times 10^3$ — $1 \times 10^4$  циклов. Дальнейшее нагружение вызывает незначительное уменьшение остаточных напряжений, и после  $1 \times 10^5$  циклов процесс снижения прекращается [76].

В институте сварки ПНР было установлено, что наибольшее улучшение упругих свойств, как следует из работы [84], происходит при обработке образцов значительными переменными напряжениями ( $\pm 15$  кгс/мм<sup>2</sup> и выше). Эксперименты, проведенные русскими специалистами [85], показали, что для снятия напряжений достаточно  $\sigma_{\max} = 0,8 \sigma_{0,2}$ . При этом отмечается существенная роль статического компонента нагрузки.

Наибольшее снижение остаточных напряжений и деформаций происходит при резонансе частоты вибрационного нагружения с какой-либо частотой свободных колебаний определенной образцом закрепленной конструкции (для виброосиловой правки наиболее эффективным считается шарпирное закрепление при использовании изгибных форм вибрационного нагружения [86]). В этом случае амплитудные величины деформаций, вызванных вибрацией, максимальны и энергия вибрационного воздействия достигает наибольшего значения.

Приложение статического усилия при виброосиловой обработке существенно повышает частоту свободных колебаний конструкций

и снижает амплитуду. Чем выше энергия вибрационных колебаний, тем меньшая величина статического усилия требуется для достижения эффекта правки [86].

Из работы [75] следует, что наибольший спад остаточных деформаций при виброобработке пластин наблюдается при напряжениях растяжения 12—18 кгс/мм<sup>2</sup>, при больших напряжениях эффект вибрирования менее значителен и приближается к чистому растяжению.

В работе [87] установлено, что величина статического усилия  $P$ ст, необходимого для достижения эффекта правки, в месте приложения усилия при виброосиловой обработке балок может быть на 40—50% меньше, чем величина статического усилия, требуемая для достижения такой же величины прогиба без вибрации (рис. 4).

Дальнейшее снижение прогиба осуществляется медленнее и связано с образованием пластических деформаций в результате движения дислокаций. Эксперименты [87] показали также, что приложение статического усилия совместно с вибрационным снижает уровень остаточных напряжений как по длине, так и по сечению сварной балки.

В работе [88] на основании проведенных расчетов определено влияние остаточных сварочных напряжений на величину частот и амплитуды виброколебаний. Показано, что эти параметры на стадии установившихся поперечных колебаний балок не зависят от наличия остаточных напряжений. Отсюда следует, что резонансные частоты и амплитудную нагрузку можно выбирать из условий вибрационного нагружения балки без остаточных напряжений [88].

Параметры виброобработки балочных сварных конструкций могут быть найдены с помощью методики, представленной в работе [82]. В работах [86, 87] резонансная частота свободных колебаний и соответствующая ей амплитуда определены для каждой конкретной конструкции с помощью амплитудно-частотной характеристики.

Главный принцип выбора параметров вибрационной обработки заключается в том, что для заметного перераспределения остаточных сварочных напряжений необходимо, чтобы амплитуды дополнительных деформаций в зоне сварного шва были соизмеримы с остаточными упругими деформациями [88].

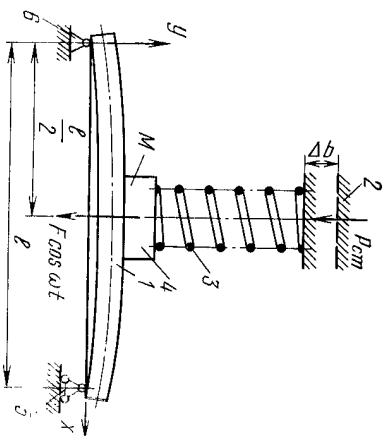


Рис. 4. Схема нагружения образца для исправления деформаций продольного изгиба: 1 — образец; 2 — нагружающее устройство; 3 — упругий элемент; 4 — вибратор; 5 — подвижная опора; 6 — неподвижная опора.

В связи с тем, что рабочие частоты, амплитуды вибраций и характер вибрационного нагружения определяются размерами, формой, массой и жесткостью изделия, параметры виброобработки на основе выявленных закономерностей, изложенных выше, могут быть установлены применительно к каждому конкретному случаю.

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВИБРООБРАБОТКИ

Большинство современных установок для виброобработки спроектировано по одному принципу и состоит из источника энергии вибрационных колебаний — вибратора, контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуры и аппаратуры управления. Установки для виброиспытаний включают, кроме того, нагружающее устройство и упругий элемент.

Наиболее распространены электромеханические экцентрик-вые вибраторы. При работе электродвигателя вибратор создает переменные нагрузки. Путем изменения частоты вращения вала электродвигателя изделие вводится в резонанс. Момент наступления резонанса устанавливается по стабильной максимальной величине амплитуды колебаний. Применяемые в СССР вибраторы (работы ИЭС им. Е. О. Патона, МВТУ им. Н. Э. Баумана) позволяют осуществлять колебания с частотой до 120 Гц.

В некоторых случаях используются строгильные вибраторы типа ИВ с постоянной частотой колебаний.

В США и Западной Европе в различных отраслях промышленности, в том числе в станкостроении, широко применяются оборудование для виброобработки фирмы Martin Engineering (ФРГ). Модель LT110JCS является в настоящее время самой совершенной установкой этой фирмы; модель LT-100R, снабженная дополнительным самопишущим прибором, позволяет с помощью графического изображения проследить за воздействием виброобработки на различные части обрабатываемого изделия [89]. Процесс обработки на данном оборудовании осуществляется следующим образом. При прохождении всего диапазона частот (до 100 Гц) определяются резонансные частоты с помощью пьезоэлектрического акселерометра. Количество вводимой энергии устанавливается по величине тока двигателя, регистрируемого амперметром. После того, как установлены 6—12 таких резонансных частот, изделие подвергается виброобработке в течение 5 мин или более на каждой из двух или трех наиболее ярко выраженных резонансных частот: низкой, средней и высокой. Затем повторно записывается значение тока, регистрируемое амперметром при пиковой нагрузке. Обычно ток двигателя снижается при этом на 10—15%, что свидетельствует о том, что процесс стабилизации произведен. Частота вибратора регулируется с точностью до  $\pm 0,05$  Гц, а величина тока двигателя —  $\pm 5\%$ . Вибраторы данной фирмы потребляют электроэнергию мощностью около 500 Вт (при напряжении 115 и

220 В), что составляет незначительную часть энергии, потребляемой при термообработке, учитывая, что время виброобработки изделия не превышает, как правило, 20 мин [78, 89, 90].

В Англии разработан портативный вибратор для снижения остаточных напряжений с частотой до 200 Гц, который питается однофазным переменным током частотой 50 Гц от силовой сети. Намечается провести его усовершенствование, применив частотный преобразователь [91].

Как правило, предпочтение отдается компактным переносным вибраторам. Однако в некоторых случаях [92] использование стационарных установок оказывается более эффективным по следующим причинам: возможность использования электродвигателя со сравнительно низкой частотой вращения, благодаря чему обеспечивается необходимый частотный диапазон вибрационного воздействия; использование ременной передачи с соответствующим передаточным числом; отсутствие ограничений по массе и мощности электродвигателя; более удовлетворительные условия работы электродвигателя. Описанная в работе [92] установка имеет активную часть, предназначенную для эффективного ввода вибраций в изделие; пассивную часть, выполняющую функцию демпфирующей подставки, на которой размещается изделие; блок управления. Подобное разделение позволяет уменьшить массу вибрационной платформы и расположить узел ввода колебаний в изделие непосредственно в месте крепления к виброплатформе вибратора, обеспечивая высокий КПД преобразования и передачи энергии электродвигателя вибратора изделию.

Вильнюсским филиалом ЭНИМСа [93] разработан электромагнитный вибратор для обработки сварных узлов металлорежущих станков и координатно-измерительных машин, отличающихся сравнительно небольшим габаритом, сложной конфигурацией и высокой жесткостью. Использование для таких конструкций известных экцентрик-вые электромеханических вибраторов осложняется из-за большого диапазона резонансных частот, распределения напряжений в разных плоскостях и неудобства крепления вибратора. Схема стэнда для виброобработки показана на рис. 5.

Электромагнитный вибратор 1 содержит две катушки для создания постоянного и переменного составляющей электромагнитного поля, одна из которых питается напряжением постоянного тока, другая — переменного. Виброобработка изделия производится следующим образом. На блоке питания и индикации 2 уста-

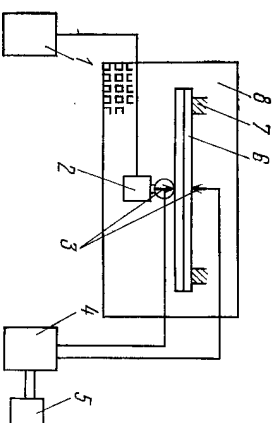


Рис. 5. Схема стэнда для виброобработки



навивается постоянное усилие пружина сердечника вибратора к изделино, а генератором звуковой частоты 5 регулируются частота колебаний и переменное усилие сердечника. При колебаниях сердечник воздействует через динамометрическую петлю на изделине, а индукционный преобразователь перемещений 3 выдает выходной сигнал, амплитуда и форма которого наблюдается в электроннолучевой трубке прибора 4. Изделие 6, установленное на виброопорах 7, и вибратор закреплены на общей плите 8 с продольными и поперечными пазами, позволяющими фиксировать изделие и вибратор практически в любом требуемом положении. С помощью этого устройства автоматически или вручную можно в широких пределах менять рабочую частоту вибратора, что позволяет легко установить амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики системы и выбрать частоты, требуемые для обработки изделия.

Виброобработка начинается с самой высокой резонансной частоты системы и проводится до тех пор, пока амперметр блока питания не зафиксировывает спад потребляемой вибратором силы тока. Когда спад прекращается, виброобработка продолжается на следующей резонансной частоте и т. д. Таким образом, применение электромагнитного вибратора позволяет проводить виброобработку сварной конструкции в широком диапазоне частот, обрабатывать различные ее части, закрепляя конструкцию консолями либо с упором на упругие опоры. Причем процесс виброобработки фиксируется как показаниями приборов, так и регистрированием амплитудно-частотной характеристики вибрируемой системы [79].

Для наиболее эффективного снижения сварочных напряжений при наименьших затратах мощности приводного двигателя электрического вибратора важно поддерживать постоянным достигнутое экстремальное значение амплитуды резонансных колебаний в процессе непрерывного изменения собственной частоты колебаний изделия. С этой целью в ИЭС им. Е. О. Патона разработано устройство для снижения остаточных сварочных напряжений [94], в котором определены моменты достижения экстремального значения амплитуды резонансных колебаний и поддержание этого значения осуществляются за счет измерения величины и знака фазового сдвига между вынуждающей силой и вынужденными колебаниями изделия и преобразования этой величины в управляющий сигнал в цифровой форме для блока управления приводом вибратора. Устройство автоматически обеспечивает поиск резонансной частоты по минимуму фазового сдвига рассогласования входных сигналов датчика амплитуды и датчика частоты и поддерживает колебания изделия на резонансной частоте [94]. Это устройство внедрено на Тираспольском заводе литейных машин им. С. М. Кирова.

Экспериментальная вибрационная установка, описанная в работе [97], позволяет проводить стабилизацию резонансной частоты вращения вибровозбудителя при помощи дополнительного синхрон-

ного двигателя переменного тока. Последний должен покрывать энергетические затраты, необходимые для поддержания постоянного числа оборотов вибровозбудителя.

В настоящее время в мире насчитывается около 10 000 виброустройств для снижения остаточных напряжений, большинство из которых работает на постоянном токе и развивает колебания с частотой до 80 Гц. За рубежом в последние годы все большее распространение получают вибраторы, работающие на переменном токе, которые позволяют проводить обработку на больших частотах и с большей величиной возмущающего усилия. Это дает возможность более эффективно применять виброобработку изделий и расширить область ее использования для узлов с большими жесткостью и массой. Кроме того, такие системы отличаются более высокой надежностью по сравнению с системами постоянного тока [91].

#### СПОСОБЫ ВИБРООБРАБОТКИ

Существуют различные способы виброобработки. Для каждого конкретного случая можно подобрать определенный вид нагружения (вибрационного и статического), который обеспечит необходимое снижение остаточных напряжений и деформаций, например для болочек — кругильные вибрационные колебания, для конструкций большой протяженности — изгибные вибрационные колебания, и т. д. Противоречивость результатов эффективности виброобработки свидетельствует о том, что к выбору способа обработки, ее параметров, схем закрепления и нагружения необходимо подходить строго индивидуально, в зависимости от типа конструкции [95]. Поэтому для успешного применения вибрационного нагружения требуется предварительно провести определенный объем исследований конкретных работ применительно к конкретному производству.

Ниже приведено описание некоторых способов виброобработки, разработанных для различных типов конструкций.

Анализ результатов экспериментальных исследований [87] позволил установить, что для балочных конструкций наиболее экономичным и эффективным является разработанный в МВТУ им. Баумана метод виброиспильной правки в режиме резонанса частоты возмущающей силы и частоты свободных колебаний статически нагруженной вибрационной системы. Причем силовое воздействие статического усилия и вибрация должно осуществляться в одном и том же направлении, перпендикулярно продольной оси балки в плоскости ее изгиба. Теоретический анализ схем закрепления [82, 86, 87] при вибростабилизации балочных конструкций показал, что наибольшие амплитуды колебаний при наименьших частотах имеют место при шарнирном закреплении концов балок.

Из работ [76, 96] следует, что наибольший эффект при виброобработке сварных трубчатых ферм и сварных рам достигается при жестко закрепленных концах изделий на опорах. Это объясняет-

ся увеличением изгибающего момента и возникновением дополнительной продольной составляющей усилия, возникающего в заделке.

Таким образом, выявлены оптимальные схемы закрепления при виброобработке балочных [87], трубчатых [76] и рамных [96] конструкций.

В связи с тем, что известные способы снятия остаточных напряжений недостаточно эффективны для деталей рамной конструкции, в ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ [98], позволяющий обрабатывать одновременно несколько собранных в пакет деталей рамной конструкции. При установке деталей, как показано на рис. 6, значительно увеличиваются жесткость конструкции и собственная частота колебаний системы. Детали 1 и 2 расплагат симметрично друг другу через прокладки 3 переменной высоты и стягивают зажимами 4, а концы изделий соединяют с помощью удаленных накладок 5.

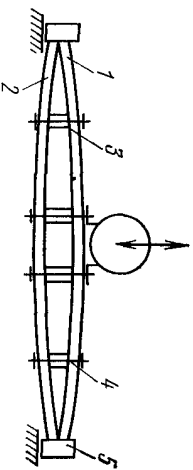


Рис. 6. Схема установки для сборки пакета деталей рамной конструкции

В известном способе вибростабилизации при наложении дополнительного статического усилия обеспечивается прогиб детали лишь в направлении действия силы. Для громоздких деталей или деталей коробчатой формы изменение направления нагружения затруднено или невозможно. В Харьковском филиале ВНИИлитмаша [99] разработан метод, позволяющий создавать знакопеременные напряжения в деталях различной жесткости и конфигурации без дополнительного их кантования. Необходимая величина напряжений может быть получена либо во всей детали, либо (в случае коробчатой формы) в каждом ее элементе. Сущность предлагаемого метода заключается в статическом характере нагружения и импульсной разгрузке. Причем время снижения нагрузки не менее чем в десять раз ниже четверти периода собственных колебаний детали с наибольшей амплитудой. Статический характер нагружения обеспечивает деформацию всей детали в направлении действия силы, а импульсная разгрузка вызывает затухающие колебания с собственной частотой. В результате создается знакопеременное нагружение всего объема детали. Необходимый характер цикла «нагружение—разгрузка» может быть получен с помощью гидравлических устройств специальных магнитоплмпульсных установок. Помимо возможности обработки деталей различной

жесткости и конфигурации способ открывает широкие возможности для управления процессом по заданной программе контроля.

Существует способ местного снятия остаточных напряжений путем наложения вибраций на поля остаточных напряжений, где вибрационные нагрузки прикладываются в одной плоскости, совпадающей обычно с плоскостью действия остаточных напряжений.

Способ виброобработки с приложением крутильных колебаний позволяет снимать остаточные напряжения в любой плоскости и особенно эффективен для конструкций, где практически невозможно приложить вибрации в направлении действия главной составляющей остаточных напряжений. Снижение напряжений происходит вследствие одновременного действия вибрации, крутильных колебаний и кругового движения.

В США широко применяется метод снятия напряжений в изделии посредством вибрации на частотах, соответствующих резонансным колебаниям каждой части изделия, в которой предполагается уменьшить напряжения [90, 91].

При виброобработке сварных конструкций повышенной жесткости из высокопрочных сталей возможно появление трещин в зонах сварного соединения [91]. Для предотвращения образования усталостных трещин и интенсификации процесса снятия внутренних напряжений в сварных изделиях (типа роторов турбин) предложен способ, при котором виброобработка всего изделия в резонансном режиме осуществляется одновременно с местным нагревом узкой зоны сварного шва [100].

Контроль воздействия виброобработки на конструкцию производится тензометрическим, магнитоупругим и другими методами. Однако после измерений может оказаться, что процесс обработки следует продолжить, для чего требуется заново установить виброобработку. Метод контроля, описанный в работе [85], заключается в том, что о завершении процесса судят по смещению резонансных пиков на шкале частот в процессе виброобработки и их стабильном положении впоследствии. Такой процесс связан с многократным переключением возбуждающего вибратора для проверки всего частотного диапазона и довольно продолжительным регистрированием положений резонансных пиков в шкале частот.

Для упрощения контроля снятия напряжений и увеличения производительности процесса снижения остаточных напряжений в различных конструкциях предложен способ контроля процесса виброобработки, при котором периодически измеряют затухание свободных колебаний обрабатываемой конструкции, вычисляют величину логарифмического декремента затухания и закатывают процесс виброобработки по достижении его постоянного значения [101]. Определенные уровни остаточных напряжений по этому способу основано на предположении [93], что логарифмический декремент затухания колебаний является функцией остаточных напряжений и деформаций изделия. Следовательно, его измерение дает информацию о наличии и величине остаточных напряжений.

## ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРООБРАБОТКИ

В технической литературе содержится мало данных о применении способа виброобработки для реальных сварных конструкций. Из всего объема научно-исследовательских работ лишь приблизительно 5% касаются определения эффективности этого перспективного метода обработки для конкретных видов изделий [91]. Это объясняется, по-видимому, недостаточной изученностью проблемы. Тем не менее, с каждым годом виброобработка все шире внедряется в производство. В частности, в СССР этот способ внедрен на Сызранском заводе тяжелого машиностроения для стабиллизации размеров сварных грубчатых ферм, в новосибирском производственном объединении «Тяжстанкогидропресс» — после черновой механической обработки станин (экономический эффект 36 600 руб.), Ивовском СПО, на Тираспольском заводе литейных машин, им. С. М. Кирова, Краснодарском станкостроительном заводе им. Г. М. Седина, Юринском машиностроительном заводе (годовая экономия электроэнергии — 3 млн. кВт) и др. Проводятся поисковые работы и исследования по снятию напряжений методом вибрации в штамно-сварных конструкциях арматуры с целью дальнейшего внедрения этого метода в производство. При этом установлено, что после виброобработки остаточные напряжения в стержневых образцах снижаются в два раза.

Разработаны вибрационная установка и технология снижения остаточных напряжений в сварных деталях газопроводов. Испытания данной установки показали удовлетворительные результаты и продемонстрировали преимущества виброобработки перед отжигом [92]. Виброспособ применяется также при изготовлении водоохлаждаемых планок, представляющих собой сложную сварную конструкцию из кислотоупорной нержавеющей жаропрочной стали (экономический эффект — 40 000 руб.) [102].

Исследования процесса виброобработки сварных конструкций проводятся в Венгрии, Румынии и других промышленно развитых странах. В Институте сварки ПНР [83] для определения влияния вибронатужения на сохранение размеров сварных элементов конструкций, подвергаемых механообработке, проводились эксперименты с фундаментными рамами дробильных мельниц и корпусами полугусей грузовых автомобилей. Наименьшие отклонения от плоскостности фундаментных рам были зафиксированы при двухкратной вибрационной обработке после сварки и черновой механообработки. Установлено, что изменение размеров и форм этих конструкций в результате виброобработки (так же, как и при отжиге) находится в допускаемых пределах.

Наибольшее распространение этот способ получил в США, ФРГ. В Англии он все больше привлекает к себе внимание при изготовлении химической и нефтяной аппаратуры, машин для целлюлозно-бумажной, пищевой промышленности, корпусов насосов, аппаратов

для точечной и шовной сварки, а также в станкостроительной промышленности.

Многолетний опыт западноевропейских фирм, использующих метод виброобработки для снижения остаточных напряжений и стабилизации размеров, доказал высокую его эффективность, возможность обеспечения достаточно жестких допусков для изделий, к которым предъявляются высокие требования по точности [89]. Так, в авиационной промышленности ФРГ виброобработка крупногабаритных сварных конструкций позволяет получить отклонение от плоскостности поверхности обрабатываемого изделия в пределах  $\pm 0,025$  мм, в то время как термический способ снижения напряжений не дает ожидаемого результата.

Фирма Vöest-Alpine AG (Австрия), выпускающая кузнечно-прессовое оборудование, применяет этот метод с 1972 г. взамен отжига. Время обработки уменьшилось с нескольких часов до 20 мин при идентичных результатах.

Фирма Nagel (ФРГ), специализирующаяся на изготовлении прецизионных и специальных металлорежущих станков, применяет способ виброобработки взамен термообработки для крупногабаритных конструкций массой до 14 т с 1974 г. и получает экономию в размере 1200 долл. на каждое изделие.

Фирма Netapp (ФРГ), выпускающая литейные машины, использует виброобработку для сварно-литых конструкций массой 6804—13 700 кг в течение восьми лет, причем данный процесс применяется как после, так и во время сварки. В результате получена значительная экономия времени, энергии, снизилась трудоемкость и транспортные расходы.

Специалисты старшей в ФРГ фирмы Kaptapp считают, что метод виброобработки лучше, чем термообработка позволяет выдерживать жесткие допуски при изготовлении кондукторов и других зажимных и сборочных приспособлений.

По данным работы [91], в Англии почти на всех станкостроительных предприятиях используют вибрационный способ снижения напряжений в основаниях, стойках, направляющих и других деталях станков и прессов как в сварном, так и литом варианте изготовления. Эффективность виброобработки подобных конструкций возрастает при создании вибраторов, работающих на переменном токе и обладающих большей мощностью. Подобное оборудование позволяет проводить виброобработку на меньших частотах, благодаря чему значительно уменьшается риск появления трещин в деталях из легированных высокопрочных сталей в процессе обработки и эксплуатации.

Одна из ведущих станкостроительных фирм Англии [91], подчитав экономическую эффективность применения вибрационного способа снижения напряжений в конструкциях взамен термообработки в течение трех-четырёх лет, определила, что годовая экономия составляет 30 000 ф. ст. О высокой эффективности способа

свидетельствуют также данные, приведенные в работах [76, 89], в соответствии с которыми стоимость виброобработки на 80—90% ниже стоимости общей термической обработки.

### ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕВОДА БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ И МАШИН НА СВАРНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ

По данным ФРГ [103], жесткость литой чугунной станины при толщине стенок 12 мм и наличии ребер жесткости не выше жесткости аналогичной сварной конструкции с толщиной стенок 8 мм при относительном снижении массы конструкции до 40%; стоимость заготовки сварной станины на 90% ниже, чем литой заготовки; при изготовлении 500 сварных станин в год их стоимость на 37% ниже литых.

Соотношение общих расходов на приобретение и изготовление станины типа ТД одношпиндельного токарного автомата в литом и сварном варианте показано в табл. 3 [16].

Таблица 3

Конструкция	Расходы, марки ФРГ			Соотношение расходов, %
	На изготовление или приобретение заготовки	На обработку заготовки	Сумма расходов на изготовление	
Литая	1390	851	2241	100
Сварная (поставка со стороны)	1072	439	1511	67
Сварная (собственное производство)	978	439	1417	63

Одним из компонентов расходов, связанных с переходом на сварное производство станков, являются затраты на механическую обработку. При изготовлении сварной станины одношпиндельного токарного автомата фирмой Нетманн Трауб Maschinenfabrik (ФРГ) расходы на механическую обработку удалось снизить на 50% [16].

В табл. 4 сопоставлены производственные затраты при механической обработке данной станины в сварном и литом исполнении (производительность—40 станин в месяц) [16].

По данным ВИСПа, средние потери металла на стружку при механической обработке сварных базовых деталей составляют 7%, литых—23%. Использование машин высокой точности для термической резки (кислородной и плазменной), позволяющих производить одновременно раздельку кромок, уменьшает, а в ряде случаев вообще исключает механическую обработку, которая необходима для получения стандартной (Х-, У- и К-образной) раздельки кромок под сварку и повышенной точности деталей. Сравнительные данные по точности магнито-копировальных, фотокопировальных и цифровых машин на основе расчетов фирмы British Oхуген

Таблица 4

Вид обработки	Производственные затраты на механическую обработку, марки ФРГ	
	литая конструкция	сварная конструкция
Горизонтальное сверление, горизонтальное фрезерование	110	48
Радиальное сверление	115	69
Зачистка, снятие заусенцев	144	15
Шабрение	52	35
Полирование	430	252
Сумма расходов на обработку	851	439
Соотношение расходов, %	100	52

(Англия) для деталей размером 4—8 м<sup>2</sup> [104] представлены в табл. 5.

Таблица 5

Показатель	Копир-чертеж в масштабе			Цифровые данные
	Магнитный папел	1:1	1:5	
Ошибка при изготовлении копируемого контура, мм	±0,1	±0,5	±0,15	±0,15
Измененные формы копира от температуры и влажности, мм	±0	±1,0	±0,2	±0,1
Ошибка при управлении по копиру, мм	±0,1	±0,3	±0,1	±0,1
Масштабный фактор	×1	×1	×5	×10
Сумма ошибок при вводе в машину для резки, мм	±0,2	±1,8	±2,25	±3,5
Точность режущей машины, мм	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5
Общая точность, мм	±0,7	±2,3	±2,75	±4,0
				±0,6

Лучшими отечественными машинами для резки с цифровым программным управлением являются ТПд-2,5 «Кристалл» и ТПд-3,2 «Кристалл», разрезающие листы длиной 2500 и 3200 мм соответственно. Точность резки на машинах «Кристалл» составляет ±0,5 мм. Из зарубежных машин для тепловой резки хорошо зарекомендовали себя машины фирмы Messer Griesheim (ФРГ), в том

числе универсальная машина Optimat, относящаяся к оборудованию портального типа, с шириной рабочей зоны 1,5—3,6 м и точностью резки  $\pm 0,5$  мм.

Наиболее высокую точность резки показывают машины с цифровым программным управлением. ВНИИавтогенмашем разработана машина модели ПК-3,5-6Ц с цифровым программным управлением, обеспечивающая точность вырезки деталей  $\pm 1$  мм при следующих размерах обрабатываемых листов: длина 8 м, ширина 3,5 м, толщина 5—100 мм. Машина оборудована двумя суппортами: двухрезовым для вертикальной резки и трехрезовым блоком для резки со скосом кромок [105].

Таким образом, в случае сварного исполнения базовых деталей и при условии внедрения новейшего оборудования и прогрессивных технологических процессов можно снизить объемы припусков на механическую обработку в зависимости от класса конструкции в среднем от 50 до 80% [81].

Обобщая накопленный в СССР опыт по переводу базовых деталей с литого на сварное исполнение, можно привести следующие данные, характеризующие сварной вариант: масса базовых деталей снижается в среднем на 30—40%, длительность процесса изготовления — в 2—3 раза, трудоемкость — на 35—50%, норма расхода металла — в 2—2,5 раза.

По статистическим данным иностранных фирм, эффективность применения сварных конструкций по сравнению с литыми при котором увеличении общей жесткости базовой детали определяется уменьшением толщины стенок на 40—50%, массы конструкции — на 25—30%, удельной стоимости 1 т (в загрунтованном виде) — на 5—10% [171].

Принимая во внимание приведенные выше показатели, несомненно, можно говорить об экономической эффективности сварных конструкций. Учитывая гибкость сварного варианта (легкость внесения конструктивно-технологических изменений), сокращение продолжительности производственного цикла, уменьшение расходов на изготовление при вводе в эксплуатацию высокомеханизированных сварочных производств, и при условии оптимального проектирования и значительной степени унификации, можно сделать вывод, что сварное исполнение деталей металлорежущих станков окажется достаточно экономичным не только в единичном, но и в серийном производстве [16, 45, 74].

Исследования, выполненные с целью определения экономически целесообразных областей применения сварных и литых базовых деталей, показали, что они определяются приведенными затратами при одном и другом способах изготовления. Характер этих затрат зависит от следующих основных факторов: массы детали, объема производства, трудоемкости изготовления, фондоемкости выпуска продукции. Из расчетов следует, что базовые детали простой конфигурации, не требующие больших трудозатрат, целесообразно изготавливать в сварном исполнении партиями до 300 шт. в год. Де-

тали сложной конфигурации, требующие больших трудозатрат, целесообразно изготавливать в литом исполнении при любой серийности. Более точные результаты могут быть получены при выполнении расчета приведенных затрат конкретной детали по вариантам изготовления, особенно если речь идет о серийности более 100 шт. в год [45].

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Анализ перечисленных проблем позволяет установить, что применение сварных базовых деталей и узлов станков и машин взамен литых в большинстве случаев технологически выгодно и экономически оправдано.

Рациональные области применения литых и сварных базовых деталей в станках и машинах определяются в зависимости от их массы, объема производства, трудоемкости изготовления.

Повышение производительности труда, улучшение качества изделий достигаются при реализации комплекса мероприятий, направленных на рационализацию методов расчета (в том числе с помощью метода конечных элементов) и проектирования сварных конструкций с учетом требований унификации и стандартизации.

Перспективным направлением является использование прогрессивных способов сварки: в смеси защитных газов, на форсированных режимах, с применением специальных проволок и порошкообразного присадочного металла и т. д.

Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о высокой эффективности виброобработки для снижения остаточных напряжений и стабилизации размеров сварных базовых деталей станков и прессов. Совершенствование отечественного виброоборудования и его серийное производство приведут к более широкому распространению данного метода в станкостроении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гриневич А. Н. и др. Электрошлаковая сварка сварно-кованой стали рамы преса усилием 1250 тс. — «Сварочное производство», 1977, № 5.
2. Адамченко В. Я., Еретин Л. П., Малай А. Е. Технологические особенности сварки преса усилием 65000 тс. — «Сварочное производство», 1977, № 11.
3. Миллер Р., Кош Г. Schweibtechnische Konstruktionen und der Leinzi-ger Fröhlichsmess. — «Schweißtechnik», 1979, 29, № 6, 268—272.
4. Welders are tipping their torches on machine tools. — «Machinery and Production Engineering», 1979, № 3467, p. 7.
5. Каминская В. В., Девина З. Т., Решетов Д. Н. Станки и копилки для обработки металлорежущих станков. М., Машгиз, 1960.
6. Харченко П. Ф., Гольба В. В. Состояние и некоторые перспективы развития сварочного производства в Японии. — «Сварочное производство», 1979, № 8.
7. Нептап А. Alexis, I. über die Karl-Heinz Gestellteile von Fräsmaschinen in Schweibkonstruktion. — «Schweißtechnik», 1979, 29, № 4, p. 161—165.
8. Matthias Matzke und Eggon Weggen. Schweißkonstruktion in Werkzeugmaschinenbau. — «Schweißen + Schneiden», 1979, № 9, p. 391—393.

9. Траубер Г. и др. Рациональная технология и высокопроизводительные станки для фрезерования и сверления. — Доклад № 4 на Международном конгрессе по металлообработке (Г. Лейпциг, 1978 г.).

10. Маэур А. Д. Конструкционные материалы для сварных станин металло-режущих станков. — Науч.-техн. сб. «Технология производства, НОТ и У». М., НИИМаш, 1979, № 5.

11. Ясуни Т. Сварные конструкции в металлоорежущих станках. — «Нихон кинка гаккаси», 1978, т. 81, № 715, с. 501—506. (Перевод № В-14206).

12. Васильев В. А., Семенов В. П. Исследование методом конечных элементов концентрации напряжений в сварных тавровых соединениях. — В сб. «Труды Ленинградского политехнического института». ЛПИ, 1978, № 362.

13. Григорьяни А. Г. Современные представления о методах определения деформаций и напряжений при сварке. — В сб. «Прочность сварных конструкций и требования контроля». М., МВТУ, 1978.

14. Talli L. The calculation of residual stresses in perspective. — «Resid. stress. Weld. Constr. and Eng. Jnl. Conf. London, 1977, v. 1», Abington, 1978, p. 49—62.

15. Бродянский И. И. Опыт проектирования базовых корпусных деталей тяжелых станков в сварном исполнении на Краматорском заводе тяжелых станков. — Науч.-техн. реф. сб. «Технология производства, НОТ и У». М., НИИМаш, 1979, № 5.

16. Крыжановский А. С. Особенности конструктивно-технологического проектирования сварных базовых деталей кузнечно-прессового оборудования. — Науч.-техн. реф. сб. «Технология производства, НОТ и У». М., НИИМаш, 1979, № 5.

17. Бродянский И. И. Применение сварных базовых деталей для тяжелых станков. — В сб. «Расчеты на прочность и жесткость». М., Станкин, 1977.

18. Махненко В. И. Перспективы применения ЭВМ для расчета на прочность элементов сварных конструкций. В сб. «Прочность сварных конструкций и требования контроля». М., МВТУ, 1978.

19. Макаров И. И. Работоспособность сварных соединений с технологическими отклонениями. Автореф. докт. дисс. М., 1977.

20. Современный уровень сварочной науки и техники в области энергетики (по материалам XXXI Конгресса Международного института сварки). — «Энергетическое строительство за рубежом», 1979, № 3.

21. Махненко В. И. Влияние остаточных напряжений на распространение усталостных трещин в элементах сварных конструкций. — «Автоматическая сварка», 1979, № 4.

22. Труфов В. И. и др. Применение ЭВМ для расчетов элементов сварных конструкций на усталость. — «Автоматическая сварка», 1977, № 4.

23. Wilsch W. Schweißgerichte Gestaltung, von Retschek-Hohrproben im Stahlbau. — «Metallhandwerk+Techt», 1979, v. 81, № 10, с. 844—846, 848.

24. Бодо Спрухайд. C-FBSW800 — обрабатывающий центр горизонтального типа со сварными станинами. — «Schwesstechnik», 1980, 30, № 2, с. 66—67.

25. Использование сварных конструкций для тяжелых станков. — «Машпиз», 1975, № 4, р. 53—60.

26. Намштер Н., Зиммер Th. Scheißkonstruktionen im Werkzeugmaschinenbau. — «Werkstatt und Betrieb», 1977, v. 110, № 9, s. 549—554 (перевод № А-54365).

27. Шольц А. Ф. Опыт проектирования и изготовления базовых деталей станков и прессов на ПО «Лязжанский завод». — Науч.-техн. реф. сб. «Технология производства, НОТ и У». М., НИИМаш, 1979, № 5.

28. Неманн Алекс, Рахе Wolfgang. Vewertungen schmelzgeschweißter Konstruktionen. Katalog für Maschinenbau und Stahlbau. — «Teich, Hoersch, Carl-Marx-Stadt», 1978, N 2.

29. Грачев К. А., Филатов Л. С. Влияние комплексной системы классификации сварных конструкций и универсально-оборудованных приспособлений на эффективность сварочного производства. — В кн. «Пути интенсификации и повышения эффективности сварочного производства. Материалы семинара». М., МДНП, 1977, с. 153—156.

30. Бернадский В. Н., Жуков В. В. Состояние и некоторые тенденции развития дуговой сварки. — «Сварочное производство», 1978, № 1.

31. Хотта Тамомити. Прогресс технологии сварки. — «Коцу гасу», 1978, т. 15, № 10, с. 526—534.

32. Аснис А. Е. и др. Прогрессивные способы сварки при изготовлении базовых деталей металлоорежущих станков, кузнечно-прессового, литейного и деформационного оборудования. — Науч.-техн. реф. сб. «Технология производства, НОТ и У». М., НИИМаш, 1979, № 5.

33. Будник Н. М. и др. Сварка в углекислом газе активированной проволокой на переменном токе. — В сб. «Вопросы механизации и автоматизации сварочного производства». Тула, ТПИ, 1977.

34. Гуднев Н. З. и др. Влияние защитных газов на технологические характеристики сварочной дуги, качество и механические свойства металла шва. — «Сварочное производство», 1977, № 8.

35. Подлапкин В. В., Аснис А. Е. Сварка в смеси защитных газов. Тезисы докладов. Всесоюзной конференции по дуговой сварке (11—12 мая 1976 г.). Киев, 1976.

36. Прогресс дуговой сварки в защитном газе. Пат. Японии кл. 12В1, (В 23К 9/16), № 52—34412, заявл. 18.09.75 г. № 50—112060, опубл. 3.09.77 г.

37. Способ горизонтальной угловой сварки стальных листов. Пат. США, кл. 219/137, (В 23 К9/00) № 4058700, заявл. 3.02.76, № 65-4950, опубл. 15.11.77 г.

38. A Method of shielded arc welding. Пат. США, кл. 219/137 WM (В 23 9/24), № 4018368, заявл. 19.11.75, опубл. 22.03.77. Приор. 26.11.74, № 49-135180 Япония.

39. Короблева В. И. Механизация и автоматизация сварочного производства. Обзор. М., НИИформатизмаш, 1978, № 10-78-31.

40. Орлов А. (обзор по материалам Международного института сварки) — «Речной транспорт», 1978, № 10.

41. Пичук И. С., Остаушкин В. Ф., Куликов Г. Д., Худяков В. В., Хейфед А. Д. Челябинский политехнический институт. Способ электродуговой сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка. Авт. свид. СССР № 563241. — ВИ 1977, № 24.

42. Попков А. М., Еланцев А. И. Система оптимизации процесса сварки в углекислом газе. — В кн. «Управление сварочными процессами», Тула, ТПИ, 1977.

43. Способ предотвращения прилипания брызг металла к свариваемым деталям. Пат. Японии, кл. 12 в 1 (В 23К 31/00), № 52—126649, заявл. 17.04.76, № 51—43882, опубл. 24.10.77.

44. Лусеу J. A. Sored whes-gesent development for high quality welding. — «Weld. and Metal Fabrication», 1977, 45, № 7, p. 443, 445—447, 449, 451.

45. Лашенко Г. И., Демьяненко Г. П., Ивашенко Г. А. Технология, проектирование и изготовление сварных конструкций в станкостроении, Киев, ВИСТ, 1980.

46. Кирилин Ю. В. и др. Сварная стойка для тяжелого вертикально-фрезерного станка. — «Станки и инструменты», 1980, № 2.

47. Кийзе З., Мёбус В. Выборочно-жесткая корробатая конструкция для станков, сварочных автоматов и роботов. — «ZIS-Mitt», 1980, т. 22, № 5, с. 483—489.

48. Применение специальных профилей проката в сварных базовых деталях станков и машин. (Мет. рек.). НИИМаш, М., 1979.

49. Олпиги Г. Современная техника производства. М., «Машиностроение», 1975.

50. Каминская В. В. Выбор оптимальных по жесткости конструктивных соотношений в размерах элементов сварных станин. Науч.-техн. реф. сб. «Технология производства, НОТ и У». М., НИИМаш, 1976, № 7.

51. Анпилогов В. Е. и др. Опыт проектирования и применения сварных базовых деталей в тяжелых станках. — Науч.-техн. реф. сб. «Технология производства, НОТ и У». М., НИИМаш, 1976, № 8.



52. Sim R. G. Gasless flux cored wire welding. — «Austral. welding Jour-  
nal», 1977, v. 21, № 4, p. 25—29.
53. Sim R. G. A new approach to submerged arc welding of low alloy steels  
with tubular wires. — «Austral. Weld. Journal», 1977, v. 21, № 5, p. 39—43.
54. Некрасов И. Г. и др. Исследование деформаций при дуговой сварке  
под флюсом с ППМ. — В сб. «Труды ВНИИ по монтажным и специальным строи-  
тельным работам», 1978, № 23.
55. Ивочкин И. И. и др. Возможность сварки с ППМ стыковых соединений  
толщиной до 40 мм за один проход. В сб. «Труды ВНИИ по монтажным и спе-  
циальным строительным работам», 1978, № 23.
56. Годай Томокадзу, Яманака Осаму. Современные тенденции в развитии  
сварочных материалов для дуговой сварки в углекислом газе. — «Есэцу гидэю-  
цу», 1977, 25, № 12, с. 39—45.
57. Дуговая горячая сварка под флюсом. — «Обзор польской техники», 1977,  
№ 10.
58. Аснис А. Е., Гутман Л. М. Особенности двухэлектродной сварки. —  
«Автоматическая сварка», 1977, № 12.
59. Jones S. V. Triple wire submerged arc welding of 25 mm steel plate. —  
«International Inst. Welding. Doc. № XII-A-158-78».
60. Меркулов В. А. Применение сварки пульсирующей дугой для выпол-  
нения стыковых соединений. — В сб. «Производство сварных конструкций в энер-  
гетическом машиностроении» (материалы семинара). Д., ДДНТП, 1977.
61. Силл Р. James D. Electroslag Weldments: Performance and Needed Rese-  
arch. — «Public Roads», 1978, v. 41, p. 181—192.
62. Спосіб електрошлакової сварки. Пат. Японія кл. 12В1 (ВЗЗК 25/00),  
№ 52—144338, заявл. 20.05.76, № 51—61185, опубл. 1.12.77.
63. Kitting R., Rothloff F. Electroslagkerbindings — Schweissen  
mit Bandedelektrode und abschmelzender Führung. — «Practiker», 1977, v. 29, № 6,  
s. 104—106.
64. Eichorn Fredrich, Hirsch Peter. Leistungssteigerung und Verbesse-  
rung der Werkstoffigenschaften beim Electroslag — Verbindungs-schweißen.  
«ZfS-Mitt» 1977, № 2679.
65. Комлан Я. Ю. и др. Некоторые особенности электрошлаковой сварки  
в продольно-радиальном магнитном поле. — «Автоматическая сварка», 1978, № 9.
66. Henderson J. D. Developments in narrow gap Welding. — «Austral  
Welding Journal», 1978, v. 22, № 3, s. 4—13.
67. Renelt Ernst, Kiesehe Manfred. Untersuchungen zum Engspalt-  
weissen. — «ZfS-Mitt» 1977, v. 19, № 6, s. 757—768.
68. Сварка и резка. Сварка плавлением. — «Есэцу гаккайсэн», 1976, т. 45,  
№ 5, с. 362—375.
69. Parkes Leslie R. The role of welding in machine tool production. —  
«Can. Mach. and Metalwork», 1977, Apr., Brit. Suppl., p. 5.
70. Sauegh Georges. Determination des caractéristiques des faisceaux dans  
un saumon à electropose. Application à l'étude et à la réalisation d'un saumon de sou-  
dage de 100 kW. These, doc. sci. phys. Univ. Paris-Sud, 1976.
71. Dietrich Walter. Investigation into electrop beam welding of heavy  
sections. — «Weld. J.», 1978, v. 57, № 9, p. 281—284.
72. Адамониш И. Ю., Криштонас В. И. Полуавтоматическая сварка  
корпусных деталей координатно-измерительных машин. — В сб. «Автоматизация  
процессов образования неразъемных соединений и упрочнения материалов в ма-  
шиностроении». М., «Наука», 1979.
73. Способ изготовления угловых корпусов станин и машин. Пат. ГДР  
кл. В210 5/16, № 138409, заявл. 17.08.78, опубл. 31.10.79.
74. Machine tool design in the GDR a change to welded structures. — «Design  
Engineering», 1979, № 1.
75. Сагадевич В. М. Методы устранения сварочных деформаций и на-  
пряжений. М., «Машиностроение», 1974.
76. Грудз А. А. Исследование деформаций сварных конструкций и изыска-  
ние способов их учета и стабилизации. Автореф. канд. дисс., Киев, 1973.

77. Недосека А. Я. и др. Прогрессивные способы снижения остаточных  
напряжений и деформаций в машиностроительных сварных конструкциях. —  
Науч.-техн. реф. сб. «Технология производства, НОТ и У». М., НИИМаш, 1979,  
№ 5.

78. Купал Вазу, Субгхатманья У. K. Vibration stress relieving. —  
«The Production Engineer», 1980, № 6.

79. Гинютис В. П., Криштонас В. И., Адамониш И. Ю. Приме-  
нение электромагнитного вибратора для уменьшения остаточных напряжений  
сварных конструкций. — «Автоматизация процессов образования неразъемных  
соединений и упрочнения материалов в машиностроении». — Труды 6-го совеща-  
ния по автоматизации процессов машиностроения (М., 1976). М., 1979.

80. Klorrel K. Sicherheit und Güteanforderungen beim Verschleppen  
Arten geschwelter Konstruktionen. — «Schweissen und Schneiden», 1954.

81. Рашик Е. П. и др. Механическая обработка деталей из листового про-  
ката для изготовления крупных стальных сварных конструкций и резервы ее сни-  
жения. — «Сварочное производство», 1979, № 8.

82. Сагадевич В. М., Завалишин Н. Н., Нашинович В. В. Уст-  
ранение деформаций сварных гаечных конструкций вибрацией. — «Сварочное  
производство», 1979, № 9.

83. Мрыка Е. Устранение остаточных напряжений с помощью нагружения  
и вибрации. — В кн. «Современные проблемы сварки в специальной электроме-  
таллургии». Киев, «Наукова Думка», 1980.

84. Миньков И. С., Мугильнер М. Н., Полянов В. Г. Влияние обра-  
ботки вибрирующим напряжением на размерную стабильность сварных узлов. —  
«Сварочное производство», 1980, № 2.

85. Пат. США № 37418900С21Д 1/04.

86. Сагадевич В. М., Нашинович В. В., Завалишин Н. Н.  
Методы снижения сварочных деформаций вибрацией с нагружением. Сб. тезисов  
докладов Всесоюзной межвузовской конференции «Прочность сварных конструк-  
ций и требования контроля». М., МВТУ, 1978.

87. Нашинович В. В. Разработка и исследование метода устранения  
деформации с нагружением. Автореф. канд. дисс. М., 1978.

88. Махненко В. И., Пивторак Н. И. Переработка остаточных  
напряжений в сварных балках при вибрационной обработке. — «Автоматическая  
сварка», 1978, № 9.

89. Вибраторы VSR. Каталог фирмы Martin Engineering (ФРГ).  
90. Grosibov R. Vibration stress relief still a hot topic. «Weld. Des. and  
Fabr.», 1979, № 5, p. 97.

91. Слэтон Р. А., Саупдлерс Г. G. Vibration stress reliefe. — «The  
Metallurgist Materials Technologist», 1976, № 12, p. 651—656 (перевод Вильнюс-  
ского филиала ЭНИМС, 1979).

92. Ярляков А. П. и др. Применение вибрационной установки для умень-  
шения остаточных напряжений в сварных деталях газопроводов. — В сб. науч.  
трудов «Управление сварочными процессами». Тула, ГПИ, 1979.

93. Криштонас В. И., Гинютис В. П., Адамониш И. Ю. Виброобра-  
ботка сварных конструкций станков и машин. — «Станки и инструмент», 1979, № 4.

94. Казимиров А. и др. Устройство для снижения остаточных напряже-  
ний. Авт. свид. СССР № 673097 — ВИ 1979, № 26.

95. Cheever D. L., Rowlands E. W. Vibration stress reliefe the answer  
to dimensional control? — «Welding Design and Fabrication», 1978, 50, № 10.

96. Зубченко О. И. и др. Применение вибрационного нагружения для сня-  
тия остаточных напряжений в сварных рамах. — «Автоматическая сварка», 1974,  
№ 9.

97. Промтов А. К., Даукшас К. К. Влияние вибрационного нагруже-  
ния на остаточные напряжения в связи со свойствами обрабатываемого материа-  
ла. — Сб. «Динамика станков» (тезисы докладов Всесоюзной научно-технической  
конференции). Куйбышев, М., ИМАШ, 1980.

98. Гребенников А. П. и др. Способ снятия остаточных напряжений. Авт.  
свид. СССР, № 637233, ВИ 1978, № 46.

99. Агешинский В. Г. Способ снижения остаточных напряжений в деталях. Авт. свид. СССР, № 637232, ВИ 1978, № 46.
100. Лазарев Д. И. и др. Способ обработки металлических изделий. Авт. свид. СССР № 508543, ВИ 1976, № 90.
101. Гинотис В. П. Способ контроля процесса виброобработки конструкций. Авт. свид. СССР № 621749 — ВИ 1978, № 32.
102. Технология изготовления нежестких деталей с использованием вибрационной обработки. — «Местный производственный опыт в промышленности», 1980, № 7.
103. Geiger M. Vlechals. Konstruktions werkstoff im wetpengmaschi-perbau. — «Werkstofftechnik», 1978, 68, № 4, 193—201.
104. Васильев К. В. Современные эффективные средства высококачественной ремической резки. — В кн. «Повышение качества и эффективности сварочного производства» М., МДНТП, 1978.
105. Лашенко Г. И. Состояние и перспективы развития сварочного производства в станкостроении. Обзор, М., НИИМаш, 1979.
106. Мейнус Вальтер, Зайдел Иоганнес. Сообщение из Центрального института технология сварки ГДР, Галле, — «ZIS—Mit», 1980, т. 22, № 5, с. 495—505.

Линия отреза

СВЕДЕНИЯ

Об использовании \_\_\_\_\_

(наименование предприятия, организации)

информации из обзора «Сварные базовые детали станков и машин»

1. Соответствует ли тема обзора Вашей информационной потребности

*Да, нет*  
(подчеркнуть)

2. Оцените выполненный в обзоре:

*Достаточно, недостаточно,*

анализ

*ошибочен*  
(подчеркнуть)

рекомендации

*Правильны, неправильны*  
(подчеркнуть)

прогноз

*Правильен, неправилен*  
(подчеркнуть)

3. Будут ли использоваться рекомендации  
материала в практических целях

*Да, нет*  
(подчеркнуть)