



ТОНКОЛИСТОВЫЕ СВАРНЫЕ СОСТАВНЫЕ ЗАГОТОВКИ «TAILORED BLANKS» В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

В. Н. БЕРНАДСКИЙ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлен обзор зарубежной периодики 1990-х годов, посвященный технологии производства сварных составных заготовок «Tailored Blanks», включая выбор исходного материала, его раскрой, особенности и разновидности процессов соединений, контроля и штамповки. Даны сведения об объемах производства и рынка составных заготовок.

Ключевые слова: лазерная, электронно-лучевая, вневакуумная и контактная шовная сварка, заготовки, автомобилестроение

В производстве и сооружении сварных изделий и конструкций неотъемлемым конструктивно-технологическим элементом являются сварные заготовки. Членение конструкций на отдельные части осуществляется еще на стадии проектирования с учетом обеспечения технологичности их производства, эффективности использования материалов, транспортной способности, упрощения монтажа и др.

По мере создания новых и развития существующих способов сварки расширялись возможности получения рациональных сварных заготовок. Так, применение автоматической дуговой сварки под флюсом дало возможность изготавливать крупногабаритные листовые заготовки (полотнища, карты) в судостроении, трубном производстве и резервуаростроении. В частности, создание метода рулонирования резервуарных заготовок в виде полотнищ, свариваемых под флюсом из листов толщиной 4...12 мм, позволило решить проблему индустриализации производства и монтажа резервуаров большой вместимости.

Технология электрошлаковой сварки открыла возможность производства крупногабаритных (толщиной до 2000 мм) сварно-кованых, сварно-литых и других заготовок в тяжелом и энергетическом машиностроении.

Производство биметаллических листовых заготовок и переходников из разнородных материалов основано сегодня на использовании сварки взрывом. Эта технология позволяет получать би- и триметаллические заготовки из материалов, практически несвариваемых обычными способами.

Современные лучевые технологии сварки и резки — электронно-лучевая (ЭЛС) и лазерная — открыли новые технологические возможности в производстве сварных конструкций и их фрагментов из прогрессивных материалов. ЭЛС в вакууме широко применяется для изготовления заготовок толщиной до 400 мм. Наиболее развитые области применения ЭЛС — авиакосмическая промышленность, ядерная энергетика, энергетическое и общее машиностроение и др.

В последние годы значительно повысилась конкурентоспособность такой лучевой технологии, как лазерная сварка, особенно при соединении и резке материалов сравнительно малых толщин. Лазерная технология находит наиболее широкое применение в современной автомобильной индустрии, где постепенно вытесняет точечную контактную сварку и даже сварку в защитных газах. В середине 1990-х гг. в мировой автомобильной промышленности уже эксплуатировалось более 5000 лазерных обрабатывающих систем (резка, сварка, поверхностная обработка и др.). Именно лазерная технология сварки с начала 1990-х гг. открыла новые возможности в производстве комбинированных составных листовых заготовок для последующей штамповки с глубокой вытяжкой элементов легковых автомобилей (кузова, рамы и др.). Такие тонколистовые сварные составные заготовки (ССЗ) заданных размеров и конфигурации в мировой практике автомобилестроения получили название «Tailored Blanks» (ТВ) [1–4 и др.] или «Tailor Welded Blanks» (ТВВ) [5–7].

Тонколистовые ССЗ «Tailored Blanks» изготавливаются с помощью сварки из двух, трех и более точно раскrojенных пластин металла с различными толщинами, физико-механическими свойствами и состояниями поверхности. Заготовки ССЗ можно рассматривать не только как полуфабрикат для штамповки деталей кузова, но и как металлоизделие с улучшенными служебными характеристиками, позволяющими не только снизить массу автомобиля, но и повысить его конструкционную надежность и безопасность эксплуатации [8, 9].

Первое промышленное применение лазерной сварки для изготовления тонколистовых штампуемых заготовок как прообраза ССЗ связывают с опытом металлургов фирмы «Thyssen Stahl». В начале 1980-х гг. на одном из предприятий этой фирмы, где с помощью контактной роликовой сварки производили укрупнение заготовок для штамповки днищ автомобилей, была применена лазерная сварка. Из двух одинаковых лент лазером была сварена заготовка панели днища шириной более 2 м для автомобиля «Audi» [1, 6]. Начиная с 1985 г. фирма «Thyssen Stahl» поставила автомобилестроителям более 3 млн таких крупногабаритных сварных тонколистовых панелей из оцинкованной стали [10].

Опыт применения лазерной стыковой сварки тонколистового металла различного качества был положен в основу промышленной технологии производства специальных ССЗ заданных типоразмеров для глубокой вытяжки кузовных элементов легковых автомобилей. На рис. 1 представлена каноническая схема производства ССЗ-ТВ, предложенная металлургической фирмой «Thyssen Stahl» [1]. По этой схеме непосредственно на металлургическом заводе ленты различных марок сталей с разными толщиной и качеством поверхности разрезают на заданные элементы, которые затем сваривают в единый лист или заготовку. В этой технологии, в частности, отражается современная идея немецких металлургов «сталь-плюс», направленная на расширение областей применения стального проката и заблаговременную реакцию на меняющуюся конъюнктуру рынка. Суть ее состоит в том, что металлургии предлагают потребителю металлопродукции, наряду с поставкой обычного сортамента металла, также готовые металлоизделия: трубы, многослойные панели и ССЗ, «скроенные» точно по заказу [7, 11].

Прорыв в области реального применения нескольких типоразмеров сварных тонколистовых заготовок в серийном производстве автомобилей осуществила в 1990 г. фирма «Volkswagen» (VW) с участием фирмы «Thyssen Stahl». Затем за сравнительно короткий (менее 10 лет) период ССЗ-ТВ получили распространение в производстве кузовов ведущих автомобильных компаний мира (VW, BMW, GM, «Ford», «Audi», «Honda», «Toyota», «Fiat», «Renault», «Volvo», «Chrysler» и др.), использующих ССЗ и при разработке своих новых моделей [6]. При этом членение кузова на фрагменты, штампуемые из ССЗ, практически однотипно для различных моделей автомобилей. На рис. 2 показаны примеры использования тонколистовых сварных заготовок для штамповки конкретных элементов кузова легкового автомобиля [9, 12].

Сварные тонколистовые заготовки сегодня уже приобрели решающее значение в автомобильной промышленности, так как их применение способствует снижению общей металлоемкости кузова, повышению его эксплуатационной надежности и сокращению производственных затрат на его изготовление. Кроме того, появляется возможность пере-

дачи части заготовительного производства непосредственно поставщикам металлопроката.

Основные преимущества сварных заготовок в производстве легковых автомобилей, по данным работ [2, 8, 9 и др.], можно свести к следующим:

- снижение массы элементов и общего расхода материалов по сравнению с обычной конструкцией легкового автомобиля;

- сокращение количества отдельных деталей, различных конструктивных накладок и усиливающих элементов;

- повышение точности геометрии конструктивных и сборочных элементов, оптимизация допусков;

- функциональное улучшение конструкции благодаря стабилизации качества и повышению надежности конструкции за счет обеспечения равнопрочности элементов при статической и ударных нагрузках, а также увеличение их усталостной прочности;

- замена нахлесточных (точечных и прерывистых) сварных соединений стыковыми, обеспечивающая сокращение объема работ по герметизации соединений по сравнению с традиционной конструкцией кузова;

- существенное повышение коррозионной стойкости кузова и его отдельных частей.

В дополнение к перечисленным преимуществам следует также отнести такие экономические выгоды от применения ССЗ-ТВ: сокращение производственных затрат на изготовление инструмента для формообразования, снижение стоимости штамповочных операций, уменьшение затрат на сборочно-сварочные работы и их объема при повышении качества. По сравнению с традиционным производством кузовов сокращаются затраты на транспортные операции, складирование металла и т. п. [4, 10].

Технология производства ССЗ независимо от модели и конструкции кузова автомобиля, технологической схемы его изготовления и общих объемов производства включает следующие основные этапы.

Конструирование (как правило, компьютерное) выполняется «точно по заказу» для конкретного элемента или узла кузова с учетом условий их реальной эксплуатации, включая возможные экстремальные нагружения [2, 4, 10, 13, 14]. Конструирование ССЗ направлено на обеспечение равнопрочности в основных критических сечениях, раци-



Рис. 1. Принципиальная схема производства тонколистовых заготовок «Tailored Blanks» заданных размеров



Рис. 2. Конструктивные фрагменты кузова легкового автомобиля, штампуемые из заготовок «Tailored Blanks»



оптимальное использование физико-механических свойств применяемых тонколистовых материалов, оптимальное расположение и минимальную протяженность сварных швов, экономный раскрой элементов и повышение общего коэффициента использования материалов. Особое внимание при конструкторской разработке ССЗ обращают на обеспечение необходимой точности сборки стыков элементов и на расположение сварных соединений в местах наибольшей вытяжки при штамповке. Последнее во многом определяет бездефектность формирования заготовки [3, 15].

Выбор исходного материала для ССЗ неразрывно связан с этапом их конструирования. В основном применяется холоднокатаная низкоуглеродистая (до 0,02 % С) «мягкая» сталь для глубокой вытяжки толщиной 0,65...2,50 мм. Наряду с ней в заготовках используют тонколистовую сталь повышенной и высокой прочности с пределом текучести 210...800 МПа, отличающуюся удовлетворительной пластичностью и хорошей свариваемостью. Для элементов конструкций кузова, которые эксплуатируются при повышенной влажности, в заготовки вставляют фрагменты из стали с двусторонним цинковым покрытием. В качестве оцинкованной стали, как правило, применяют стали повышенной и высокой прочности. Широкая номенклатура современных тонколистовых сталей различной прочности и качества покрытий поверхности создает большие возможности для конструирования заготовок. Дифференцированное использование в ССЗ сталей с повышенной прочностью и цинковым покрытием, имеющих, как правило, более высокую стойкость, обеспечивает дополнительный экономический эффект [2, 7, 8, 14].

Объемы применения алюминиевых сплавов в автомобильной промышленности постепенно увеличиваются. Так, в автомобилестроении ФРГ в 1980–1990 гг. доля алюминиевых сплавов составляла 5 % общего объема использования конструкционных материалов, а в 1995–2000 гг. — 9 % [7]. Процесс постепенной «алюминизации» уже охватил и производство кузовов легковых автомобилей, что, естественно, выдвинуло проблему изготовления ССЗ из тонколистовых алюминиевых сплавов. Ряд металлургических и автомобильных фирм США, Канады и ФРГ наладил производство в небольших объемах тонколистовых ССЗ из алюминиево-магниевого сплава (типа АА 5182) толщиной 0,8; 1,0 и 1,5 мм [7, 12, 15].

Раскрой металлического листа или ленты толщиной 0,65...2,50 мм на элементы заданных размеров и геометрии в основном производится на прессах или пресс-ножницах, что обеспечивает необходимую прецизионность резки и хорошее качество кромок реза. Последнее особенно важно для последующей лазерной сварки элементов встык без зазора. Наряду с механической резкой в производстве ССЗ применяют лазерную и гидроабразивную вырезку элементов заготовок [4, 5, 10].

Соединение тонколистовых элементов при производстве размерных ССЗ или при обычном укрупнении однородных заготовок под штамповку включает ряд процессов сварки, которые несмотря

на принципиальные отличия по своим физическим принципам приемлемы для выполнения технологической операции по сварке заготовок. Эти процессы, кроме безусловного требования к их экономической эффективности, должны также отвечать следующим требованиям [4]:

сварной шов должен быть равномерным по длине, а его толщина не должна превышать толщину исходного материала;

сварное соединение должно сохранять пластичность и способность к формоизменению при штамповке;

металл сварного соединения по прочности не должен уступать исходному металлу элемента ССЗ с минимальной прочностью.

В соответствии с современным уровнем сварочной техники при производстве стальных ССЗ применяются следующие технологические процессы [9, 16–18]:

контактную роликовую сварку с раздавливанием кромок;

прессовую сварку с индукционным нагревом; аргонодуговую сварку неплавящимся электродом (WIG);

лазерную сварку; вневакуумную (в атмосфере) электронно-лучевую сварку (ВВ ЭЛС);

гибридные технологии, например лазер + WIG.

Сварку составных заготовок из сплавов алюминия производят с применением CO₂-лазера для малых толщин, а при толщинах более 1,0...1,5 мм рекомендуется процесс WIG выполнять на постоянном токе в аргоногелиевой смеси [12, 17].

В серийном производстве ССЗ сегодня выпускаются тонколистовые заготовки исключительно с прямолинейными сварными стыками. Это отчасти определяется и существующим типом установок, и линией по резке, сборке и сварке заготовок. Дальнейшая конструкторская оптимизация заготовок предполагает также применение нелинейных, замкнутых и контурных швов для приварки или сварки усиливающих сечение элементов ССЗ (рис. 3). Соответственно изменится концепция сварочного оборудования, повысятся требования к сборке элементов под сварку. Следует заметить, что усложнение конфигурации сварных швов и соединений допустимо только при использовании лучевых или гибридных технологий.

Контроль и испытание ССЗ имеют определенную специфику, учитывая малую толщину материала, применяемые способы сварки и условия последующей работы соединений в процессе глубокой вытяжки при их формоизменении в штампах.

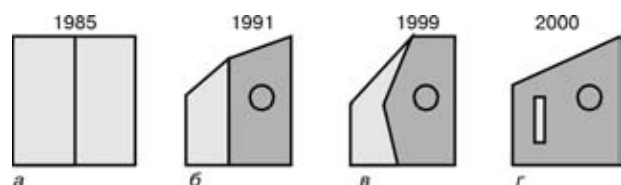


Рис. 3. Этапы развития конструкций ССЗ-ТВ: а — укрупненный формат; б — с прямолинейным сварным швом; в — с нелинейным сварным швом; г — со вставным элементом

Качество собственно сварного стыкового шва, выполненного лазером на тонком (0,8... 1,5 мм) металле ССЗ, может быть оценено с помощью сухого ультразвукового контроля с использованием EMUS-техники (метод электромагнитной акустики с использованием горизонтально поляризованных плоских волн). В случае обнаружения при ультразвуковом контроле дефектов в сварном шве их дополнительно идентифицируют при помощи микрофокусного рентгеновского просвечивания [19].

Качество швов ССЗ, выполненных роликовой сваркой с раздавливанием кромок, оценивается непосредственно в ходе процесса (как при обычной роликовой сварке) с применением систем контроля на основе алгоритмов нечеткой логики и нейронных сетей.

Испытания готовых ССЗ в первую очередь включают всесторонние исследования, в том числе физико-механических свойств металла сварного шва и сварных соединений. При разработке технологии сварки и при выборочном производственном контроле качества сварных соединений заготовок в основном оценивают прочность и пластичность соединения, а также пригодность конструктивных фрагментов заготовки со сварным швом к глубокой вытяжке. Испытания на растяжение производят на плоских образцах ($\delta_1 = \delta_2$ и $\delta_1 \neq \delta_2$) с поперечным и продольным расположением сварного шва. Способность к глубокой вытяжке при штамповке оценивают при механических (по Эриксону) или гидравлических испытаниях на выдавливание.

В образцах на выдавливание сварной шов обычно располагается экваториально. При таких исследованиях также оценивают влияние разнотолщинности сварных элементов, превышения утолщения сварного шва и упрочнения после его раскатки, а также влияние сопутствующей термообработки сварного соединения и др. [4, 15, 20].

Формообразование ССЗ в готовый фрагмент кузова автомобиля осуществляется путем их штамповки. Конструкция штампового инструмента для глубокой вытяжки ССЗ имеет ряд отличий, определя-

емых особенностями сварной разнотолщинной заготовки. При проектировании и изготовлении штампов для формообразования ССЗ учитывают ее разнотолщинность, различие механических свойств металла отдельных элементов, способ сварки и свойства металла сварного шва, результаты механических испытаний сварных соединений на статическое растяжение и глубокую вытяжку, а также ряд общих положений о поведении сварного соединения при штамповке. В частности, при вытяжке заготовки в штампе трещины и разрывы металла чаще образуются по более тонкому металлу и вдоль шва. На узких швах, выполненных лазером, при вытяжке возможно возникновение поперечных трещин. Штампы для формообразования ССЗ рекомендуются проектировать так, чтобы сварные соединения располагались только перпендикулярно или под определенным углом к краю матрицы. На рис. 4 представлена оптимизированная по геометрии и расположению сварных соединений в штампе ССЗ, сваренная лазером из трех частей (St405, $\delta = 1,0 + 1,5 + 1,0$ мм) [3, 15].

Технологические особенности сварки ССЗ из стали и алюминиевых сплавов, а также совершенствование соответствующих процессов сварки являются предметом постоянного внимания автомобилестроителей, металлургов, технологов-сварщиков и разработчиков сварочного оборудования. В соответствии с современным уровнем промышленного производства ССЗ в основном находят применение три способа сварки: контактная роликовая с раздавливанием кромок, лазерная и электронно-лучевая в атмосфере. Рассмотрим некоторые особенности этих процессов.

Контактная роликовая сварка с раздавливанием кромок является одной из разновидностей процесса обычной шовно-роликовой сварки. В отличие от последней свариваемые листовые элементы располагают между роликовыми электродами с очень небольшой нахлесткой (~1,28). В процессе образования сварного шва интенсивно разогреваются и края нахлестки, которые раздавливаются усилием

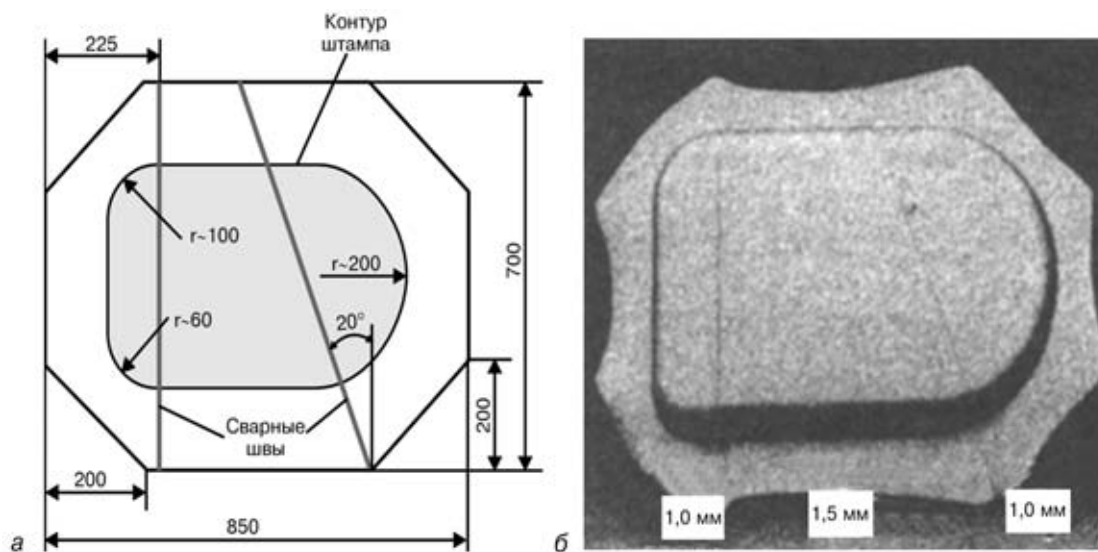


Рис. 4. Оптимизированная по условиям штамповки размерная ССЗ, сваренная из трех элементов: а — схема тонколистовой заготовки; б — отштампованная деталь



Рис. 5. Объемы производства в Западной Европе ССЗ-ТВ, свариваемых контактной роликовой и лазерной сваркой, включая собственное производство автомобилестроительной промышленности

сварочных роликов с образованием небольшого утолщения. При необходимости утолщение сварного соединения может быть устранено в результате его последующей механической раскатки в горячем состоянии сразу после сварки или за счет отдельной технологической операции. Скорость шовной сварки с раздавливанием находится в пределах 4... 8 м/мин.

Определенным преимуществом этого способа сварки является то, что для протяженного соединения тонколистовой стали не предъявляются повышенные требования к качеству кромок после резки и точности сборки нахлесточного соединения под сварку (допуск $\pm 0,5$ мм). Сварной шов и соединение в целом имеют большую ширину, чем при лазерной сварке. Сравнительно низкие значения твердости металла сварного шва и металла околошовной зоны обеспечивают достаточно высокую пластичность соединения, что важно при последующей штамповке сварных заготовок [8, 5, 12].

Процесс применим и для сварки заготовок из оцинкованной стали (требуется только увеличение сжатия), однако ширина выгорающего цинкового покрытия в зоне сварного шва в этом случае значительно больше, чем при лазерной сварке. Кроме того, для сохранения стабильного сопротивления в месте контакта ролика с металлом необходимо следить за чистотой рабочей поверхности сварочных роликов и обеспечивать их механическую очистку от налипающих остатков покрытий. Это существенный недостаток данной технологии [8, 10].

Роликовая сварка с раздавливанием кромок, применяемая в производстве ССЗ, постепенно вытесняется лазерной. Так, например, фирма VW с 1991 г. преимущественно использовала роликовую сварку, а с 1996 г. в основном перешла на лазерную [10]. Такое радикальное решение было принято ис-

ходя из ряда экономико-технологических соображений. В будущем эта фирма предполагает использовать шовную сварку только в производстве заготовок для продольных балок и стоек (колонок). Лазерная и роликовая сварка с раздавливанием кромок могут дополнять друг друга в производстве ССЗ. В настоящее время ряд европейских (VW, «Audi», «Fiat», BMW и др.) и японских («Toyota», «Mitsubishi» и «Daihatsu») автомобильных фирм используют обе технологии. Известные фирмы по производству ССЗ «Thyssen Tailored Blanks» (ФРГ) и «Solblank» (Испания) также еще поставляют ряду европейских автомобильных компаний заготовки под штамповку, сваренные роликовой сваркой с раздавливанием кромок [21, 22].

В США фирма «Precision Blank Welding Co.» производит ССЗ для автомобильной промышленности, используя оборудование для роликовой сварки фирмы «Soudronik Ltd.». Фирма «Mediana Blanking, Inc.» изготавливает размерные ССЗ для заводов фирмы «General Motors» с 1983 г. по технологии роликовой сварки с раздавливанием кромок и с одновременной горячей раскаткой утолщения шва [12].

В последние годы новые инвестиции вкладываются преимущественно в создание установок и линий для лазерной сварки ССЗ. Как видно из рис. 5, объем производства заготовок, соединяемых контактной роликовой сваркой в 1997–2000 гг., почти стабилен, а выпуск заготовок с использованием лазера непрерывно возрастает [10].

Лазерная сварка основана на бесконтактном нагреве свариваемого металла световым пучком с высокой плотностью энергии. Небольшой диаметр фокусируемого лазерного пучка (менее 0,4... 0,5 мм) позволяет выполнять очень узкие (0,5... 1,5 мм) стыковые швы на листах толщиной 0,1... 2,0 мм со скоростью 6... 8 м/мин (СО₂-лазер, 4 кВт). Сварной шов имеет хороший вид, небольшое утолщение ($\leq 0,05\delta$) и сохраняет необходимую коррозионную стойкость [4]. Лазерная сварка при соединении пластин ССЗ различной толщины (с соотношением $\leq 1:3$) обеспечивает получение сварного шва с плавным переходом (рис. 6).

Несмотря на повышенную твердость металла шва и околошовной зоны, сварные соединения ССЗ, выполненные лазерной сваркой, отличаются достаточной пластичностью и хорошей штампуемостью [8, 9]. Для улучшения хорошей штампуемости сварных соединений заготовок из высокопрочных сталей некоторых марок рекомендуется послесвароч-

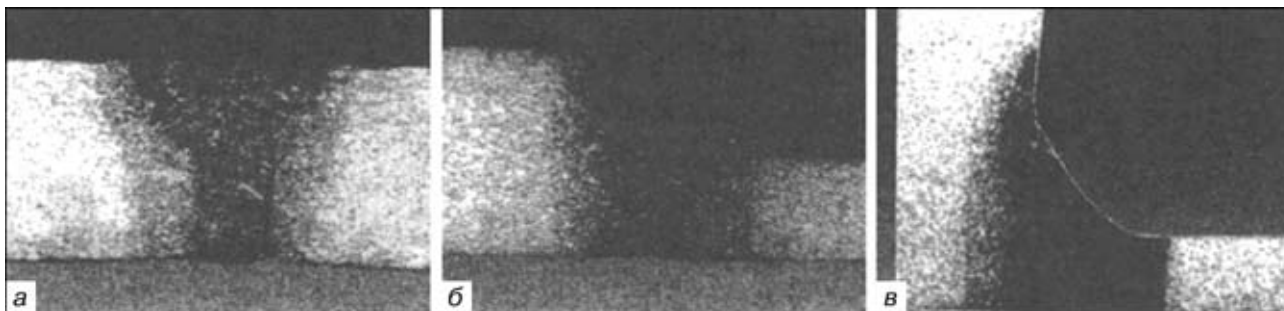


Рис. 6. Поперечное сечение сварных соединений ССЗ, выполненных лазерной сваркой: а — холоднокатаная сталь St14, $\delta = 1,2+1,2$ мм; б — сталь St14, $\delta = 1,2$ мм+сталь St14, $\delta = 0,6$ мм; в — сталь St14, $\delta = 2,0$ мм+оцинкованная сталь ZStE220P, $\delta = 0,6$ мм

ная термообработка соединения расфокусированным лазерным пучком пониженной мощности [20].

В качестве защитного газа при лазерной сварке стальных заготовок могут применяться гелий, аргон или их смесь ($\text{Ar} + 7,5\% \text{He}$). Расход газа при $v_{\text{св}} = 5 \dots 6$ м/мин в среднем составляет $15 \dots 16$ л/мин. Упомянутые защитные газы практически не влияют на форму и качество сварного шва, а также на способность сварного соединения к глубокой вытяжке, оцениваемую по методу Эриксона [2, 4].

Технология лазерной сварки металла малых толщин стыковых соединений предъявляет высокие требования к качеству сборки и зажатию стыка. Кромки свариваемых элементов заготовки должны быть строго прямолинейны, без заусенцев, вмятин и т.п. Ни одна из кромок не может иметь волнистость более 0,04 мм, а зазор в стыке не должен превышать 0,08 мм [4, 9, 12]. Такой допуск на зазор между состыкованными кромками рекомендуется при лазерной сварке ССЗ из металла толщиной 0,5... 3,0 мм, хотя общепринятая норма — $< 10\%$ δ .

Большие затраты на прецизионную подготовку кромок могут быть уменьшены благодаря применению комбинированного (гибридного) процесса, сочетающего лазерную сварку с аргодуговой неплавящимся электродом. Гибридный процесс на основе сочетания Nd:YAG-лазера и WIG-процесса, обеспечивающий лучшее заполнение зазора и более «мягкий» режим при сохранении высокой скорости сварки применительно к производству ССЗ-ТВ, разрабатывается в Фраунхоферовском институте лазерной техники [16, 17].

При лазерной сварке элементов заготовок из оцинкованной стали выгорает очень узкая полоска покрытия в зоне, непосредственно примыкающей к сварному шву. Для обеспечения качественных соединений оцинкованной стали и уменьшения вредных выделений иногда практикуется предварительная зачистка кромок от покрытия всего на 0,5... 1,0 мм [8].

Для соединения пластин ССЗ из алюминиево-магниевого сплава толщиной 0,8... 1,5 мм рекомендуется преимущественно лазерная сварка и вневакуумная (ВВ) ЭЛС. Требования к качеству подготовки кромок, точности сборки стыка для лазерной сварки алюминия такие же, как и для стали. С учетом более высокой теплоемкости алюминия необходима большая, чем при сварке стали, мощность лазера и плотность энергии, составляющая $1 \dots 2$ МВт/см². Применяют как CO_2 -, так и Nd:YAG-лазеры [12, 15, 23]. Поскольку сварные швы на алюминии склонны к пористости, в Эдисоновском институте сварки ведутся исследования по модификации лазерной оптики, обеспечивающей получение плотных швов на ССЗ [23].

Производственные агрегаты и линии для лазерной сварки ССЗ имеют различные схемы и последовательность технологических операций. Они в основном оснащаются сварочным оборудованием на основе CO_2 -лазера мощностью 4... 6 кВт и реже 10 кВт [12, 16]. В Западной Европе такие лазеры поставляет известная фирма «Trumpf Lasertechnik» (ФРГ), которая ежегодно выпускает более тысячи CO_2 -лазеров (≤ 30 кВт) и Nd:YAG-лазеров (≤ 4 кВт). На североамериканском континенте про-

изводство лазерных систем для сварки ССЗ осуществляют крупнейшие фирмы США «Rofin-Sinar», «Siemens Co.», а также «Convergent-Energy» и др. [12].

Первый британский агрегат для выпуска ССЗ оснащен CO_2 -лазером «ЭКОСС» мощностью 5 кВт и системой «летающей» оптики фирмы «Held». Зажимы-фиксаторы позволяют сваривать швы длиной до 2,25 м, рядом расположен стол 2,5×2,5 м для лазерного раскроя составных элементов или резки сваренных заготовок. Научно-технической основой этой технологии стали результаты программы Eureka-194 «Промышленное применение высокоомощных CO_2 -лазеров», завершенной в 1994 г. Британским институтом сварки совместно с рядом институтов и промышленных фирм [8].

Применение прогрессивных Nd:YAG-лазеров ранее сдерживалось из-за сравнительно высокой стоимости, однако некоторые производители заготовок уже успешно используют их в производстве. Так, например, американская компания «Utilase Blank Welding Technologies» на одной из линий сварки заготовок установила Nd:YAG-лазер мощностью 3 кВт [5, 12, 16].

Последние разработки в области лазерных технологических систем обеспечивают возможности передачи пучка мощностью до 4... 5 кВт к обрабатываемому изделию через оптоволоконный световод, что дает заметные преимущества в отношении гибкости и общей стоимости системы, в том числе для роботизированных комплексов и агрегатов сварки и последующей термообработки или резки ССЗ [5, 6].

Электронно-лучевая сварка в атмосфере (вневакуумная) как разновидность лучевых технологий, несмотря на определенный скепсис специалистов по поводу промышленного использования этого процесса, в настоящее время достаточно широко разрабатывается применительно к сварке тонколистовых ССЗ [9, 12, 16, 18]. Еще в 1995 г. на ежегодной сварочной выставке AWS американской компанией PTR была представлена технология ВВ ЭЛС, в том числе тонколистовых заготовок из стальных и алюминиевых элементов [12]. По мнению разработчиков, ВВ ЭЛС интересна как альтернативный процесс для серийного производства тонколистовых ССЗ. Это достаточно универсальный и высокопроизводительный способ выполнения стыковых соединений малых и средних толщин, основанный на применении электронной пушки специальной конструкции со ступенчатой, дифференциальной откачкой вакуума. Мощность пушек — 15 и 30 кВт при ускоряющем напряжении соответственно 150 и 175 кВ [16, 18]. Небольшой диаметр пучка, фокусируемого на изделии, позволяет и при ВВ ЭЛС получать узкие швы. Во избежание существенного расфокусирования пучка в атмосфере рабочее расстояние между соплом и свариваемой заготовкой рекомендуется поддерживать не более 10 мм. Для защиты от образующегося при ВВ ЭЛС рентгеновского излучения на агрегатах предусматриваются специальные защитные экраны [9, 16].

При ВВ ЭЛС требования к подготовке кромок и стыка значительно меньше, чем при лазерной сварке. Сканирование электронным пучком попе-



рек оси стыка способствует нагреву более широкой зоны и лучшему заполнению зазоров в стыке, а также в отдельных случаях позволяет исключать послесварочную термообработку. Процесс ВВ ЭЛС более производителен, чем роликовая контактная с раздавливанием кромок и лазерная сварка тонколистовых заготовок. Так, при использовании электронно-лучевой пушки мощностью 15 кВт с ускоряющим напряжением 150 кВ скорость сварки заготовок из сталей St1405/ZStE260, $\delta = 0,7/1,45$ мм составляет 21,6 м/мин при мощности пучка 15 кВт, а при сварке заготовок из алюминиевых сплавов $AlSi_2/AlMg_5$, $\delta = 1,25/3,0$ мм рабочая скорость сварки достигает 10 м/мин при мощности пучка 9 кВт [8].

Среди рекомендуемых областей применения ВВ ЭЛС, определяемых современным уровнем разработки электросварочного оборудования, на первом месте находится массовое производство тонколистовых ССЗ. В Германии уже эксплуатируется одна промышленная установка ВВ ЭЛС (30 кВт, 75 кВ). В США они распространены больше (смонтированы уже десятки подобных установок) [6].

Выбор определенного процесса сварки при организации производства ССЗ обычно базируется не только на оценке технологических возможностей, но и на анализе преимуществ для конкретных элементов кузова (днище, стойки, двери и др.). Большое значение имеет и стоимостное сравнение технологий в зависимости от их типажа и объемов производства [5, 12].

Производство и рынок сварных составных заготовок. Технология производства тонколистовых ССЗ является одной из перспективных в автомобильной промышленности Западной Европы, США и Японии. Начиная с 1990 г. непрерывно растут объемы производства и применения таких заготовок, увеличивается количество предприятий, специализирующихся на изготовлении ССЗ-ТВ, а также предприятий, выпускающих линии и агрегаты по резке, сборке, сварке и штамповке заготовок заданных размеров и конфигураций.

О динамике роста рынка сварных составных заготовок в Западной Европе можно судить из рис. 7.

Европейский рынок ССЗ сегодня лидирует в мире и наиболее ярко отражает общемировую тенденцию роста использования таких заготовок в автомобильной промышленности. В 1999 г. объем поставок металлургической промышленностью ССЗ превысил 350 тыс. т, а в 2000 г. ожидалась реализация заказов в объеме около 450 тыс. т. К этому

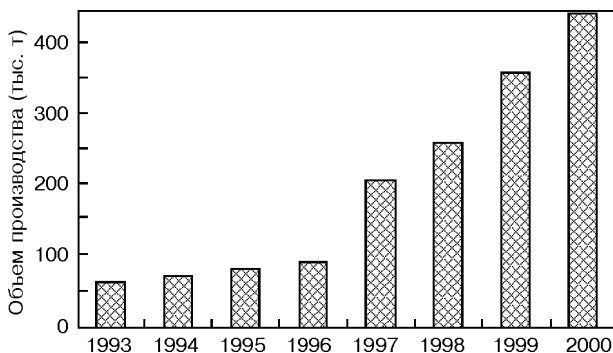


Рис. 7. Рост производства ССЗ-ТВ в Западной Европе

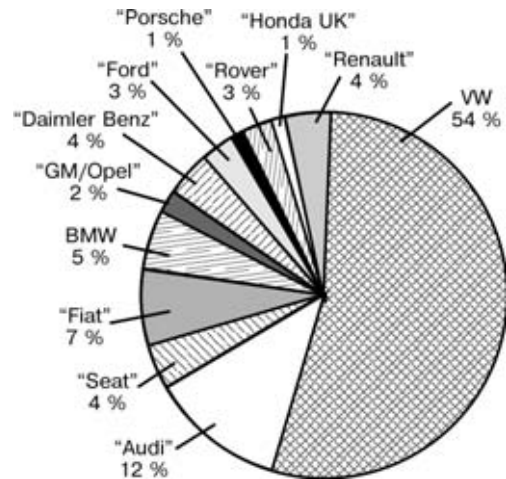


Рис. 8. Объемы применения ССЗ-ТВ различными автомобильными фирмами Западной Европы (1998 г., общий объем 250 тыс. т; данные об объемах собственного производства ССЗ-ТВ на фирмах не включены)

еще следует добавить не менее 70...80 тыс. т заготовок, производимых непосредственно европейскими автомобильными фирмами (например «Fiat», «Volvo», «Renault», «Ford»). Объемы применения ССЗ при производстве различных марок автомобилей в 1998 г. [10] представлены на рис. 8.

Большую часть заготовок автомобильной промышленности Западной Европы ныне поставляют дочерние специализированные предприятия крупных металлургических компаний «Thyssen Fugetechnik», «Heesch Platinen» и «Solblank (Sollac) Tailor» [10]. Следует отметить, что все они в зависимости от типоразмеров заготовок применяют лазерную и контактную сварку (см. рис. 5). Интенсивно наращивает мощности по выпуску заготовок итальянская металлургическая компания «Sollac», которая на своем дочернем предприятии «Solblank» уже запустила 14 производственных линий лазерной сварки и готовит запуск еще четырех в Великобритании и Северной Америке мощностью примерно 20000 т/год каждая [22]. Крупные металлургические объединения активно создают совместные предприятия в других странах. Так, например, фирма «Thyssen Tailored Blanks» создала совместное предприятие в Индонезии и Детройте (США), где с фирмой «Worthington» запустила линию по лазерной сварке тонколистовых ССЗ стенок и дверей к новой модели автомобиля «Cadillac».

В Великобритании промышленная группа «British Steel» организовала ряд центров по обслуживанию пользователей металлопродукции, в том числе специальное предприятие-центр по обеспечению автомобилестроителей ССЗ. За последние годы «British Steel» создала еще одно предприятие мощностью 125 тыс. т заготовок в год с удвоением объема выпуска к 2001 г., которое поставляет сварные заготовки также на автозавод «Toyota» в Турции (партии заготовок поступают в специальных поддонах-контейнерах, защищающих их от влаги) [8, 13, 25].

В США первым крупным пользователем тонколистовых ССЗ стала «Детроитская тройка» («Ford», GM, «Chrysler»). В 1994 г. они использо-

вали около 3 млн заготовок, а в 1997 г. — уже более 13 млн ССЗ в год. Динамика роста производства и поставки на рынок ССЗ в поштучном исчислении представлена на рис. 9. В 2002 г. ожидается поставка автомобилестроителям более 180 млн заготовок. За 10 лет объемы выпуска заготовок вырастут почти в 18 раз [24].

Производство ССЗ в США в основном сосредоточено на независимых специализированных фирмах, сотрудничающих с компанией «Armco Steel». Лидерами по применению лазерных технологий в производстве ССЗ являются «Utilase Blank Welding Technologies, Inc.» и «Thyssen-Worthington Blank Co.» (ТВВ). Кроме того, ССЗ производит фирма «Precision Blank Welding Co.» (контактная сварка с раздавливанием кромок и ВВ ЭЛС), «Mediana Blanking, Inc.» и др. В последние годы фирма «Utilase» расширила свои производственные возможности с шести сборочно-сварочных линий, каждая из которых имеет мощность около 250 тыс. заготовок в год и занимает площадь 900... 1200 м², до 28 линий. Это дает возможность фирме поставлять до 10 млн заготовок в год. Фирма ТВВ Со. совместно со своими дочерними предприятиями эксплуатирует более 23 агрегатов-линий по производству сварных заготовок. Производство также расширяется, в частности на основе применения лазерных VIL систем канадской фирмы VIL/GM, разработанных специально для производства ССЗ [12].

В Японии тонколистовые ССЗ изготавливает сеть как специализированных фирм, так и автомобильных заводов «Toyota», «Mitsubishi» и «Daihatsu». Только на этих трех автомобилестроительных предприятиях применяются лазерная и контактная шовная сварка с раздавливанием кромок (заготовки дниц), на остальных используется исключительно лазерная [25].

Общемировой промышленный выпуск тонколистовых ССЗ и их использование автомобильной индустрией в 1996–1998 гг., на основании последних японских данных [24], можно ориентировочно оценить в 380... 400 млн заготовок в год. При этом примерно около 70 % общемировых поставок обеспечивает Западная Европа, 20 % США и 10 % Япония. Согласно этому же источнику, около 290 млн заготовок в год производилось на поточных сборочно-сварочных линиях и 100 млн — на отдельных агрегатах и комплексах (без производственных линий).

Тонколистовые ССЗ «Tailored Blanks», изготовленные из современных материалов и с применением прогрессивной технологии сварки, положены в основу перспективной конструкции сверхлегкого кузова автомобиля XXI в.

Ежегодно в мире выпускается свыше 32 млн легковых автомобилей и не менее 25 млн джипов, микроавтобусов и минигрузовиков. Для мировой металлургической промышленности это гигантский рынок сбыта ежегодно более 50 млн т различных металлов, в первую очередь стали и алюминия. Естественно, что автомобильные фирмы заинтересованы в непрерывном снижении затрат металла на единицу своей продукции. С другой стороны, современное автомобилестроение должно удовлетворять расту-

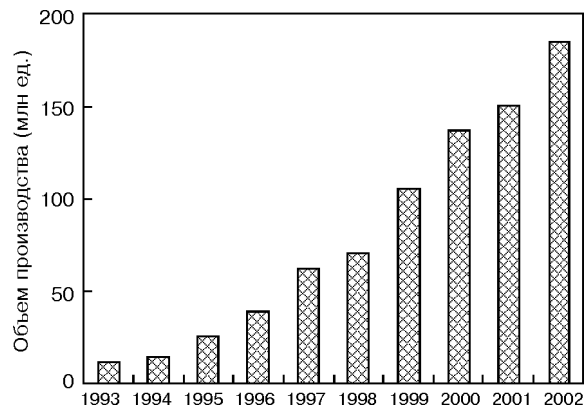


Рис. 9. Производство тонколистовых заготовок «Tailored Blanks» в США в 1993–2002 гг.

щим требованиям к экологической безопасности автомобилей. Данные факторы определяют современную стратегию разработки и организации производства перспективных моделей автомобилей с уменьшенными массой, расходом топлива и выхлопами токсичных газов.

Для решения этой проблемы металлурги предлагают автомобильной индустрии новые марки хорошо свариваемых сталей повышенной и высокой прочности, отличающихся при этом достаточно высокой пластичностью. Среди них — тонколистовые стали с упрочненной поверхностью, холоднокатаные двухфазные стали, TRIP (Transformation induced plasticity)-стали, горячекатаные стали, легированные углеродом, марганцем и хромом [26].

Благодаря интенсивно развивающимся технике и технологии лазерной сварки и обработки металлов, металлурги совместно с автомобилестроителями, нашли новый эффективный путь снижения массы автомобиля за счет создания принципиально нового конструктивного элемента — тонкостенных ССЗ «Tailored Blanks». На недавней международной конференции «ALAW-2000» представитель компании GM отметил, что прогресс в области лазерной сварки ССЗ специального раскроя феноменален; автомобильные компании только США используют более 100 млн заготовок в год и их количество растет невероятно быстро [27].

В настоящее время именно ССЗ из сталей повышенной прочности и алюминия положены в основу создания сверхлегкого кузова для перспективных моделей автомобилей. В 1998 г. успешно завершён крупный международный проект ULSAB («Ultra Light Steel Auto Body»), в разработке которого принимали участие 35 европейских, американских и азиатских металлургических фирм. Был создан сверхлегкий кузов, масса которого на 25 % меньше, таковой аналогичного серийного кузова. При этом кузов стал прочнее, жестче и безопаснее. Он передан для производственной обработки фирме «Porsche». Опытный кузов по проекту ULSAB более чем на 65 % состоит из стали повышенной и высокой прочности. Около 50 % конструктивных фрагментов кузова отштамповано из сварных заготовок «Tailored Blanks». В настоящее время данное направление получило очередной импульс: принят новый международный проект ULSAB-2, согласно которому такой высокоинновационный продукт, как



тонколистовые ССЗ «Tailored Blanks» получат новое развитие.

Не исключена вероятность того, что подобная технология производства тонколистовых ССЗ на металлургических или специализированных предприятиях может быть распространена и на изготовление сварных заготовок для последующей штамповки корпусных конструкций сельскохозяйственной техники, мебели, бытовой техники и др.

1. *Schneider C., Prange W.* Tailored Blanks — ein Werkstoff fuer neue Formen der Konstruktion // Thyssen Technische Berichte. — 1992. — № 1. — S. 97–106.
2. *Schneider C., Fzings A.* Laserstrahlgeschweißte Platinen — ein neuartiges Konstruktion-selement // Blech Rohre Profile. — 1993. — № 4. — S. 304–311.
3. *Siegert K., Knabe E.* «Tailored Blanks» — eine neue Technologie zum Automobilleichtbau // Ibid. — 1995. — № 3. — S. 161–171.
4. *Vollerstein F.* Tailored Blanks // Ibid. — 1995. — № 3. — S. 172–178.
5. *Baron J. S.* A cost comparison of weld technologies for Tailor welded blanks. // Welding J. — 1997. — № 10. — P. 39–45.
6. *New applications for TWBs — and laser welding // Welding and Joining Europe.* — 1998. — № 10. — P. 31.
7. *Вильхельм М., Рацум К.* Материалы и процессы как факторы прогресса в автомобилестроении // Черные металлы. — 1995. — № 3. — С. 33–38.
8. *Waddell W., Davies G. M.* Laser welded tailored blanks in the automotive industry // Welding and Metal Fabrication. — 1995. — № 3. — P. 104–108.
9. *Stegemann T., Frings A.* Fügeverfahren zur Erzeugung von maßgeschneiderten, geschweißten Platinen (Tailored Blanks) // DVS-Berichte-Band 168. — 1995. — S. 21–25.
10. *Jaroni U., Dohz Gh.* Tailored Blanks — von der Marktnische zur weltweiten Production // Stahl und Eisen. — 1998. — № 8. — S. 35–38.
11. *Фордран Р.* Сталь — это будущее // Черные металлы. — 2000. — № 5. — С. 51–55.
12. *Irving B.* Welding tailored blanks is hot issue for automakers // Welding J. — 1995. — № 8. — P. 49–52.
13. *Ayres K.* Laser welding tailored blanks for automotive assembly // TWI Connect. — 1994. — № 59. — P. 3.
14. *Ratzek Ul., Greis P.* Das ULSAB-Proect: Neue Wege beim Automobilleichtbau mit Stahl // Stahl und Eisen. — 1998. — № 8. — S. 45–48.
15. *Hibben M., Stemmiel F., Fischer J.* Tailored Blanks aus Aluminium // Blech Rohre Profile. — 1995. — № 6. — S. 394–397.
16. *Bachem H.* Neue entwicklungen in der Strahltechnik // Schweissen und Schneiden. — 1997. — № 7. — S. 481–484.
17. *Irving B.* Automotive engineers plunge into tomorrows problems // Welding J. — 1994. — № 12. — P. 47–49.
18. *Diltthey U., Behr W.* Elektronen-strahlschweißen in Atmosphere // Schweissen und Schneiden. — 2000. — № 8. — S. 461–465.
19. *Laber G.* Qualitaetsueberwachung der das Laserstrahlschweißnaechte von Tailored Blanks // Ibid. — 2000. — № 5. — S. 308.
20. *Draugelates Ul., Bouafi B., Daniel St.* Auswirkung der Nachbehandlung auf die Naechteigenschaften von quetschnaht- und laserstrahlgeschweißten Feinblechen // Ibid. — 2000. — № 1. — S. 24–30.
21. *Baron J.* An update on mach seam resistance welding // Welding J. — 1994. — № 4. — P. 35–39.
22. *Sollac-european* automotive market leader // Steel Times. — 1999. — № 6. — S. 260–261.
23. *Irving B.* The auto industry grears up for aluminium // Welding J. — 2000. — № 11. — P. 63–68.
24. *Сварка* раскroенных заготовок в автомобилестроении // J. of the Japan Welding Society. — 2000. — 69, № 1. — P. 4.
25. *Slim-med-down* and specialising // Steel Times. — 1995. — № 7. — P. 262.
26. *Шульц Э.* Облегченные элементы автомобилей из новых сталей // Черные металлы. — 1998. — № 3. — С. 40–46.
27. *Irving B.* Lasers continue to penetrate automotive production lines // Welding J. — 2000. — № 6. — P. 33–38.

The review of literature of the 1990s on the technology of manufacture of tailored blanks, including selection of an initial material, location and spacing of the blanks, peculiarities and modifications of the processes of joining, inspection, testing and formation, is given. The data on production and market of the tailored blanks are presented.

Поступила в редакцию 22.01.2001