

УДК 620.18:621.791

DOI: 10.30987/2223-4608-2021-11-3-11

С.В. Анахов, к.ф.-м.н.

(Российский государственный профессионально-педагогический университет,
620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11),

А.В. Матушкин, к.т.н., **А.С. Гоголев**, магистрант

(Уральский федеральный университет, 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

E-mail: s_anakhov@yahoo.com

Оптимизация технологии раскроя толстолистовых металлов термическим способом

Приведен анализ влияния различных технологических решений, применяемых при термической резке толстолистовых металлов для снижения деформаций получаемых заготовок. Предложена технология газокислородной резки, использующая последовательность раскроя без локализации нагрева. Показан эффект улучшения эффективности и качества производства с применением разработанной технологии резки.

Ключевые слова: термическая резка; напряжение; деформация; газокислородная резка; качество реза.

S.V. Anakhov, Can. Sc. Physics and Mathematics

(Russian State Vocational Pedagogical University, 11, Mashinostroiteley str., Yekaterinburg, 620012)

A.V. Matushkin, Dr. Sc.Tech., **A.S. Gogolev**, Master's student

(Ural Federal University, 1, Mira str., Yekaterinburg, 620078)

Optimization of the technology of cutting heavy-gage sheet metal by thermal method

The analysis of the influence of various technological solutions used in the thermal cutting of heavy-gage sheet metals to reduce the deformations of the resulting piece parts is given. It has been suggested to use a gas-oxygen cutting technology with packing sequence without localization of heat build-up. The effect of improving the efficiency and quality of production using the developed cutting technology is shown.

Keywords: thermal cutting; stress; deformation; oxygen gas cutting; cutting quality.

Современные методы раскроя металла дают производителю возможности выбора из достаточно широкого спектра технологий – от механической до различных вариантов термической резки (газокислородная; плазменная; лазерная; гидроабразивная и т.д.). Проблема выбора решается с учетом физико-химических свойств металла, а также технико-экономических показателей качества и экономичности процесса.

В данной работе подробно рассмотрена технология газовой резки секторов из толсто-

листового металла для изготовления сварным способом фланцев большого диаметра. Применение подобной технологии требует решения задачи оптимизации, связанной с выбором наилучшего метода раскроя, позволяющего за счет уменьшения деформации при термической резке добиться максимальной точности и качества заготовок.

Проведенный авторами анализ показывает, что разработанные на сегодняшний день методы снижения деформаций и искажений геометрических форм, получаемых из толсто-

стенных заготовок после термической резки, находят свое применение лишь в определенных случаях из-за ограничений, связанных с особенностями эксплуатации порталных машин термической резки, а также геометрической формы и веса заготовок. Полученные на основании проведенных исследований результаты позволяют сформировать рекомендации для изготовления сварных конструкций, в которых используются подобные геометрические формы заготовок, позволяющие исключить из технического процесса последующую правку заготовки, значительно уменьшить

припуск на механическую обработку и увеличить коэффициент использования материала.

Исследуемый процесс предназначен для изготовления кольца из стали 09Г2С с габаритными диаметрами 2086×1947, высотой 47 мм, массой изделия 129 кг. Кольцо изготавливается из 6 секторов сваркой в среде углекислого газа. Сварка производится проволокой 1,2 Св-08Г2С, сварной шов С25 ГОСТ 5264-80 3-й категории по ОСТ 3-4001-77. Разделка кромок производится согласно эскизу, изображенному на рис. 1.

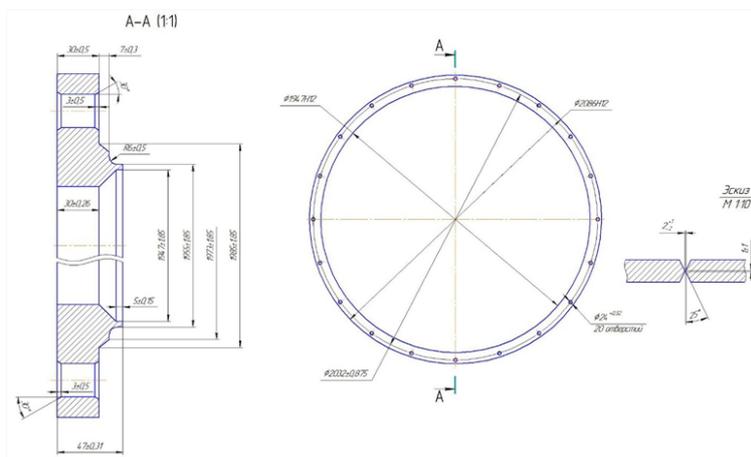


Рис. 1. Эскиз изделия

Базовая технология получения заготовок кольца в форме секторов заключается в раскрое толстолистного металла (габариты листа – 1260×550×50 мм) на порталной машине газокислородной резкой (скорость резки – 22,2 м/ч (6 мм/с), объемный расход газа – 1,5 м³/ч). Припуск на механическую обработку заложен в соответствии с ГОСТ 12169-82 и составляют 6 мм по всему вырезаемому контуру. Предельные отклонения размеров вырезаемых заготовок установлены согласно ГОСТ 14792-80 по 2 классу для резки на серийно выпускаемых машинах термической резки в производственных условиях и составляют ±3,5 мм. Схема последовательности вырезки заготовок по базовой технологии представлена на рис. 2 (путь инструмента указан стрелками).

Направление обхода контура заготовки выбрано с таким расчетом, чтобы в первую очередь обрабатывались кромки, примыкающие к металлу, идущему в отход. В последнюю очередь выполняется рез, отделяющий заготовку от основной массы листа. Раскрой заготовок осуществляется единым резом, без прожига разрезаемого листа.

В результате раскроя заготовок по базовой технологии и последующего их обмера были получены результаты, представленные в табл. 1.

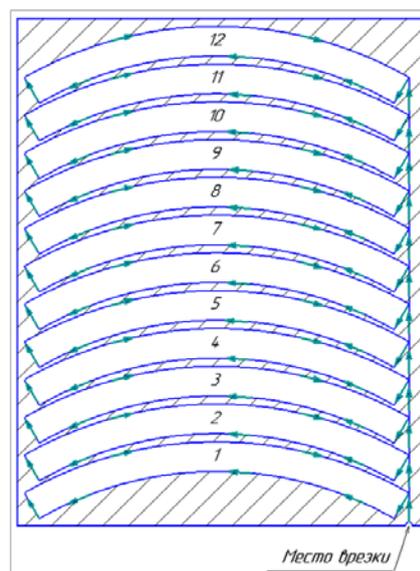


Рис. 2. Порядок раскроя заготовок по базовой технологии

Их анализ свидетельствует, что из 12 заготовок лишь 1 имела допустимый размер, а подавляющая часть имела отклонения вне заданного геометрического диапазона. Высокий процент полученного брака послужил основанием для отладки и пересмотра технологического процесса получения данного вида заготовок.

1. Отклонение размеров заготовок, вырезанных по базовой технологии

Радиус	Допустимый диапазон $R_{\min} \dots R_{\max}$, мм	Фактический радиус $\langle R \rangle \pm \Delta R$, мм
Внутренний	964...971	949 ± 9
Наружный	1045,5...1052,5	1035 ± 8

Основной причиной высокого брака являются деформации заготовок, полученных по технологии термической резки. Деформация листа и вырезаемой из него детали обусловлена значительной величиной внутренних напряжений, вызываемых местным нагревом при резке. Величина возникающих в металле напряжений определяется характером температурного поля (величиной температуры и градиента её изменения в продольном и поперечном направлении от линии реза), а также жесткостью разрезаемого листа [1]. Образующаяся деформация проявляется в виде изменения размеров заготовок по сравнению с конструкторской документацией, а также в виде укорочения, удлинения или изгиба элемента.

Известно несколько способов, позволяющих снизить деформации по кромкам реза. Одним из таких способов является заземление концов реза [1], когда первоначально выполняют продольные резы, не доводя их до конца, а затем поперечные. Непрорезанные участки между соседними частями листа называют перемычками, которые выполняют так же и при вырезке фигурных деталей.

Уменьшать деформации можно предварительным подогревом места вырезки детали, что приводит к более равномерному охлаждению металла. Этот способ рекомендуют для вырезки мелких и тонких деталей. Металл подогревают до температуры 300...500 °С. Подогрев желателен также для трудно разрезающихся и склонных к образованию закалочных микроструктур сталей [1].

Существенное влияние на точность вырезаемых деталей оказывает направление машинной резки, когда от листа, закрепленного жестко, с одного конца отрезается полоса в направлении от закрепления к свободному концу и от свободного конца к закрепленному. При термической машинной резке по программе или копиру без закрепления разрезаемого листа возникающие деформации будут вызывать произвольные перемещения листа на опорах в направлении наименьшей величины силы трения. В результате вырезаемые с помощью газовой горелки резки детали наряду с деформациями изгиба могут иметь самые разнообразные отклонения от чертежных размеров [2].

Одним из эффективных методов борьбы с деформациями прямоугольных деталей в этом случае является резка двумя одновременно действующими резаками, перемещаемыми по листу ручным или машинным способом. Так как деталь вырезается одновременно по двум противоположным кромкам, увеличение деформации её не происходит.

Еще одним способом снижения деформации является резка на максимальной (для данного класса качества реза) скорости, с минимальной мощностью подогревающего пламени и минимальным (в соответствии с требованием к процессу) расстоянием между торцом мунштука и поверхностью разрезаемого металла [3]. Величина вводимой погонной энергии в этом случае уменьшится, что приведет к уменьшению нагрева листа, а также уменьшению величины его деформации.

Для практической реализации данного метода в ряде случаев (при вырезке широких деталей) применяется искусственное охлаждение разрезаемого металла водой непосредственно за резаком, которое эквивалентно уменьшению погонной энергии при резке. Однако применение дополнительного охлаждения в случае узких кромок может привести к увеличению конечных деформаций и поэтому нерационально [4].

Помимо перечисленных способов уменьшения термической деформации можно упомянуть схему «П-образной» резки, которую целесообразно применять для резки длинномерных полос. Эта схема предусматривает частичную резку контура и использование «совмещенного реза» [5] (рис. 3), а для уменьшения числа врезок с одновременным использованием техники частичной резки контура – резка по траектории «Змейка» (рис. 4). Этот метод подходит для резки одинаковых заготовок.

Следует также обратить внимание на правило «жесткости заготовки и жесткости материала» [6], которое заключается в том, что при резке контура точка врезки выбирается таким образом, чтобы сначала вырезались участки контура, расположенные в непосредственной близости к границе материала, либо к границе вырезанной области, а завершение резки происходило по участку контура, граничащего с «жесткой» (неврезанной) частью области. Анализ температур листового материала в процессе резки показывает, что средняя температура в области твердости при резке в случае выбора точки прожига в соответствии с правилом твердости детали может быть на 120° ниже, чем при резке в нарушение этого правила [5].



Рис. 3. Схема «П-образной» резки

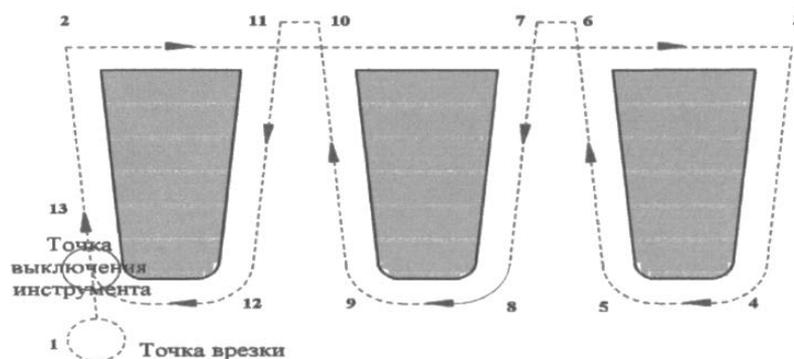


Рис. 4. Метод резки «Змейка»

Анализ предложенных способов снижения деформации листов и вырезаемых из них деталей при термической резке, свидетельствует о том, что выбор оптимального метода является весьма сложной задачей. Проведенные в этой области исследования в большинстве своем решают данную задачу лишь для частных случаев и не могут охватить всего многообразия термической резки деталей сложной конфигурации из листов самой различной толщины и размеров. Данное обстоятельство заставляет прибегать к экспериментальным методам определения оптимальной технологии раскроя металла, выбираемой из нескольких вариантов, учитывающих рекомендован-

ные выше способы.

В нашем случае общей задачей является уменьшение внутренних напряжений в вырезаемом листе. Для решения данной проблемы было предложено исследовать несколько способов изменения технологии термической резки (табл. 2): увеличение скорости резки заготовок с сохранением качества реза, предварительная термообработка листа для снятия внутренних напряжений материала перед его раскроем, резка с оставлением перемычек по контуру вырезаемой заготовки и организация схемы резки, не создающая локализации, при которой последующие заготовки не будут попадать в активную зону резки.

2. Исследуемые технологии и факторы, влияющие на деформацию заготовок

Исследуемые технологии	Последовательность резки	Отсутствие внутренних напряжений в листе	Жесткое закрепление заготовки
Резка из отожжённого листа	Резка на проход, последовательно, аналогично базовой технологии	С предварительным отжигом листа	Без фиксации заготовки, аналогично базовой технологии
Резка с перемычками	Резка на проход, последовательно, аналогично базовой технологии	Без предварительного отжига, аналогично базовой технологии	Перемычки
Резки от центра к краям	Последовательность резки без локализации нагрева	Без предварительного отжига, аналогично базовой технологии	Без фиксации заготовки, аналогично базовой технологии

В качестве основных критериев эффективности рассматриваемых технологий были взяты параметры качества поверхности реза для деталей и заготовок, регулируемых ГОСТ 14792-80: точность реза; шероховатость поверхности реза; наличие шлака и графа на нижней кромке; равномерность ширины реза по всей толщине разрезаемого металла; степень оплавления верхней кромки.

Раскрой металла производился с применением портальной машины термической резки (МТР) «Термит», модель ПКПЛЦ-2,5-12 (рис. 5), предназначенной для резки листовой низкоуглеродистой стали (толщиной от 8 мм до 160 мм) смесью пропана и кислорода, а также для плазменной вырезки деталей без разделки кромок под сварку (толщиной стенки от 1,5 мм до 40 мм) с точностью воспроизведения контура $\pm 0,2$ мм.



Рис. 5. Машина термической резки «Термит», модель ПКПЛЦ-2,5-12

Для раскроя стали толщиной 50 мм использовалось наружное сопло и внутренний мундштук фирмы ESAB (оптимальное расстояние между торцом мундштука и поверхностью разрезаемого металла – 7...8 мм). Режимы резки представлены в табл. 3.

Термообработка листа производилась с использованием печи отпускной шахтной ПШО 15.40/10 (рис. 6). Для снятия предполагаемых напряжений в раскраиваемом листе были использованы режимы отжига, представленные в табл. 4.

Измерения отклонений от конструкторской документации в части внутренних и наружных диаметров производились с применением координатно-измерительной машины Hexagon

Absolute Arm 7230 с пространственной точностью $\pm 0,025$ мм.

3. Режимы автоматической газовой резки

Толщина материала, мм	Давление на входе в горелку, МПа (кгс/см ²)		Чистота кислорода, %
	пропан	кислород	
50	0,07 (0,70)	0,68 (6,80)	99,8



Рис. 6. Печь отпускная шахтная ПШО 15.40/10

4. Режимы отжига листа

Температура загрузки, °С	Температура нагрева, °С	Время нагрева, ч	Температура выдержки, °С	Время выдержки, ч
≤ 650	625 ± 25	1,0...2,0	625 ± 25	1,0...1,5

В табл. 5 представлены результаты раскроя металла (5 образцов с габаритами 170×60×50 мм) на различной скорости резки, позволившие определить наилучшее значение скорости в 360 мм/мин (21,6 м/ч), при котором за счет минимизации тепловложения сочетается высокий уровень производительности с сохранением качества поверхности реза.

После определения оптимальной скорости реза был проведен эксперимент по резке толстостенных заготовок из заранее отожженного листа. В связи с ограниченными габаритами загрузочной цеховой печи размеры используемого для эксперимента листа были оставлены 1250×550 мм. Заготовки располагались аналогично базовой технологии, согласно рис. 7 (стрелками указан путь режущего инструмента, цифрами – порядок раскроя заготовок).

5. Результаты исследований качества реза (ГОСТ 14792-80) при различных скоростях раскроя металла

№ образца	Скорость реза, мм/мин (м/ч)	Оплавление верхней кромки, мм	Отставание от реза, мм	Шероховатость поверхности реза Ra	Отклонение от перпендикулярности, мм
1					
	250 (15)	5	нет	50	0,8
2					
	290 (17,5)	3	нет	50	0,5
3					
	330 (20)	1,5...2	3	25	0,6
4					
	360 (21,6)	1,5...2	8	50	0,5
5					
	400 (24)	Образец имеет значительное отставание от реза, неизбежно приводящее к появлению мест с не прорезом металла при смене направления движения инструмента			

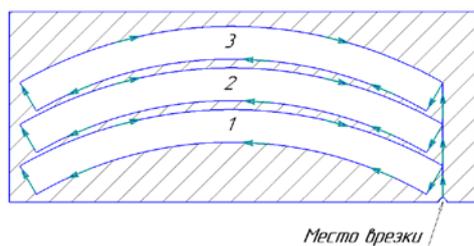


Рис. 7. Схема резки заготовок из отожжённого листа

Результаты резки представлены на рис. 8. Для визуализации и получения числовых данных о температурном поле процесс разделительной резки контролировался тепловизором.

Представленные на рис. 9 тепловые поля, снятые в процессе остывания металла, свидетельствуют о достаточно равномерном распределении температур в пределах площади вырезанных заготовок.



Рис. 8. Контур секторов, вырезанных из отожженного листа

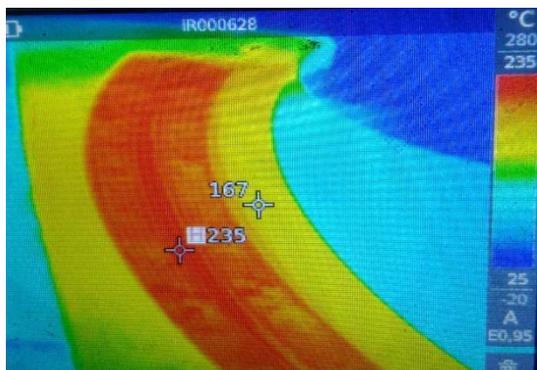


Рис. 9. Распределение температур после резки заготовок из отожженного металла

После остывания и извлечения заготовок был произведен их обмер, который показал более качественные результаты (табл. 6) по сравнению с базовой технологией, однако усредненные результаты и размеры 2-х из 3-х измеренных заготовок оказалась за пределами допустимых диапазонов.

6. Отклонение размеров заготовок, вырезанных из отожженного листа

	Допустимый диапазон $R_{min}...R_{max}$, мм	Фактический радиус $\langle R \rangle \pm \Delta R$, мм
Внутренний радиус	964...971	961±8
Наружный радиус	1045,5...1052,5	1041±8

Следует также учесть, что данный способ раскроя значительно удорожает процесс резки, так как увеличивается количество дополнительных операций (нарезка карт; транспортировка к месту отжига; отжиг; обратная транспортировка), а также возрастание общих временных затрат и увеличенный коэффициент использования материала.

В описанном далее эксперименте была проверена обоснованность практического применения раскроя заготовок из толстолистного металла с оставлением перемычек вдоль контура реза. Врезку и дальнейший маршрут резака по этой схеме целесообразно произвести с нижнего правого края листа и

далее обойти весь контур заготовок по часовой стрелке, пользуясь правилом жесткости заготовки (рис. 10).

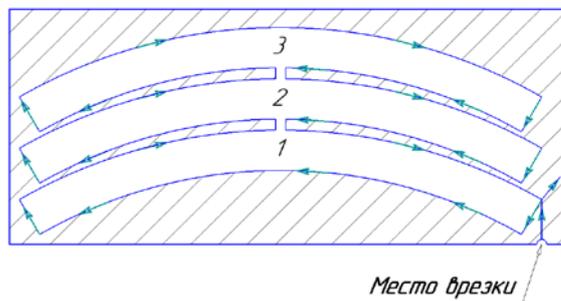


Рис. 10. Последовательность резки заготовок с перемычками

Перемычки целесообразно оставлять минимального размера для возможности дальнейшего извлечения заготовок из листа. Ввиду особенности работы портальной машины термической резки целесообразно оставить неразомкнутым общий контур всех вырезаемых заготовок. Резка заготовок по схеме с разомкнутым контуром существенно усложняет проработку управляющей программы, требует дополнительных врезок в металл, что увеличивает тепловложения, вызывает припуск с учетом диаметра кратера от врезки и повышенный расход режущего газа и инструмента, а также создает затруднения при извлечении заготовки.

После резки, остывания и извлечения заготовок был произведен их обмер, который показал, что у всех заготовок наблюдается значительный перепад (сдвиг) контура в 3...5 мм на участках нахождения перемычек (рис. 11).

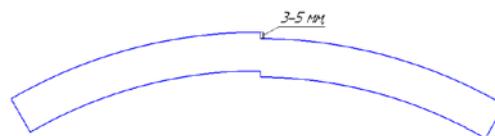


Рис. 11. Смещение кромок заготовок в районе перемычки

В связи с тем, что все три полученных сектора имеют ярко выраженный дефект геометрической формы, данные заготовки были забракованы. Исправление данного дефекта путем подварки, либо механической зачистки было признано нецелесообразным.

Заключительным этапом экспериментального исследования стала проверка технологии вырезки заготовок по схеме от центра листа к его краям. В данном эксперименте была проверена рабочая гипотеза, выдвинутая в ходе анализа расчетов, выполненных по методике И.П. Трочуна [7]. Согласно данной гипотезе

резка второй и последующих заготовок по базовой технологии происходит в области с наибольшими значениями остаточных напряжений, поэтому после их освобождения собственные деформации суммируются с имеющимися. Это приводит к увеличению деформации всех последующих заготовок до того момента, пока тепловложения от источника

нагрева не сравняются с теплоотводом. После этого увеличение отклонений в радиальных размерах прекратится.

С учетом данной гипотезы было предложено производить, в отличие от базовой технологии, раскрой от центра листа к его краям, согласно рис. 12.

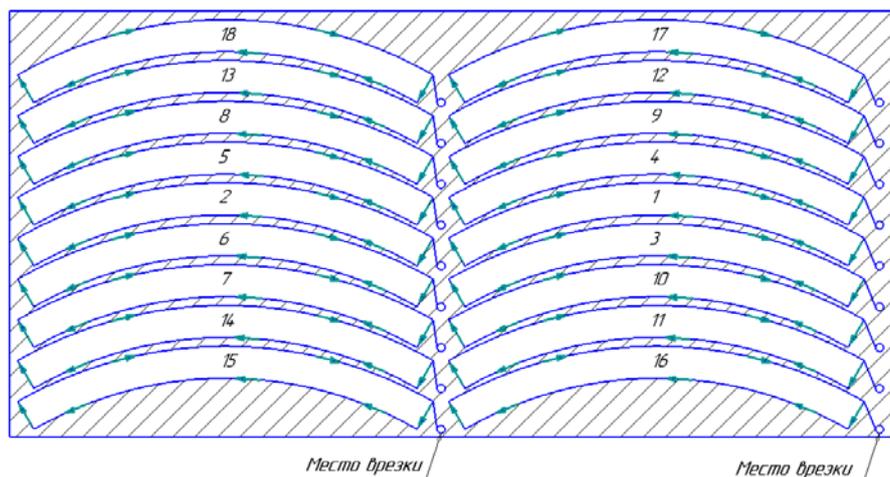


Рис. 12. Порядок раскрой заготовок по схеме резки от центра к краям

Суть предложенной схемы резки основывалась на следующих положениях:

- 1) равномерный нагрев средней части пластины на первой стадии процесса резки;
- 2) выбор порядка вырезки последующих заготовок, обеспечивающего снижение напряжений и деформаций, полученных от предыдущих резов.

Этот метод позволит организовать схему резки, при которой заготовки будут вырезаться в областях с более низкими значениями напряжений. В результате деформации от последних резов должны создавать обратные деформации и деформации, полученные от предыдущих резов, должны в итоге иметь меньшие значения.

Материал и параметры резки, используемые в данном эксперименте, были аналогичны применяемым в базовой технологии. Контур каждой заготовки имел сквозной прожог. Расстояние от вырезанного контура к месту новой резки в металл инструмент проходил на повышенной скорости без отключения резака. Результаты резки показаны на рис. 13.

После остывания и извлечения заготовок из листа был произведен их обмер при помощи координатно-измерительной машины Hexagon Absolute Arm 7230. Представленные в табл. 7 результаты свидетельствуют о наилучшем качестве реза по сравнению со всеми ранее исследованными способами.

Полученные размеры находятся в пределах допустимых диапазонов геометрических раз-

меров, при этом процент бракованных деталей составил наименьшее, по сравнению с предыдущими результатами, значение (рис. 14).

7. Отклонение размеров заготовок, вырезанных по схеме от центра листа к его краям

	Допустимый диапазон $R_{min} \dots R_{max}$, мм	Фактический радиус $\langle R \rangle \pm \Delta R$, мм
Внутренний радиус	964...971	965±4
Наружный радиус	1045,5...1052,5	1050,3±3,5

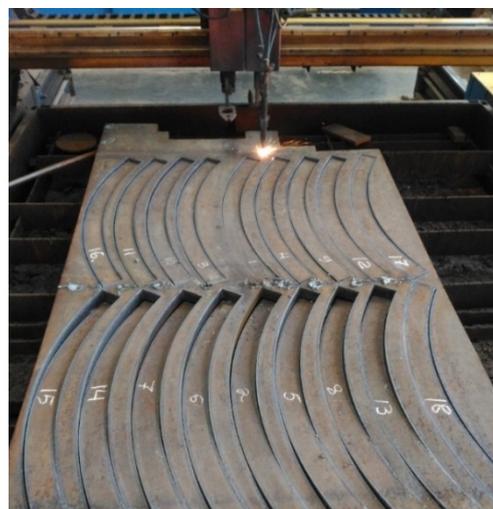


Рис. 13. Раскрой заготовок по схеме резки от центра листа к его краям

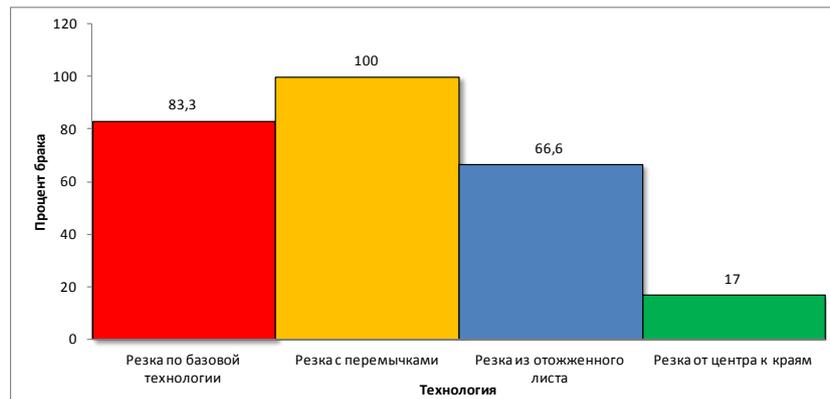


Рис. 14. Показатели брака при различных технологиях резки

Общий процент заготовок, имеющих отклонения в радиальных размерах, составляет 39 %, из них условно годными (исправимыми), за счет последующей механической обработки можно считать 22 % заготовок, т.е. количество неисправимых заготовок составляет 17 %. Экономическая оценка показывает, что затраты на доработку заготовок в расчете на годовую программу производства 200 колец (1200 заготовок) при резке по разработанной технологии могут быть снижены на сумму порядка 350 тыс. руб.

Представленные в работе результаты свидетельствуют о возможности решения проблемы высокого брака заготовок, получаемых методами термической резки толстолистового материала. Разработанная технология термической газовой резки снижает величину термических деформаций заготовок и повышает качество выпускаемой продукции и экономическую эффективность производства. Представляется целесообразным провести дальнейшую отладку описанной технологии путем применения различных комбинаций раскладок заготовок на листе при неизменном направлении резки от центра листа к его краям. В целях дальнейшего совершенствования эффективности технологий получения заготовок из толстолистовых материалов целесообразно исследовать и другие методы термической разделки, например, технологию прецизионной узкоструйной плазменной резки [8, 9], обеспечивающую максимальное качество реза металлов исследуемых толщин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыбаков, В.М. Сварка и резка металлов. – М.: Высш. школа, 1979. – 214 с.
2. Глизнаменко, Д.Л. Газовая сварка и резка металлов. – М.: Высш. школа, 1969. – 304 с.
3. Овчинников, В.В. Технология газовой сварки и резки металлов. – М.: Издательский центр Академия, 2016. – 240 с.
4. Деформации при кислородной резке. [Электронный ресурс] URL: <https://metallischekiy-portal.ru/articles/svarka/>

[gazovaa_rezka/deformacii_pri_kislorodnoi_rezke](https://metallischekiy-portal.ru/articles/svarka/gazovaa_rezka/deformacii_pri_kislorodnoi_rezke)

5. Петунин, А.А. О некоторых стратегиях формирования маршрута инструмента при разработке управляющих программ // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 13. – №2. – С. 280-286.

6. Трочук, И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке. – М.: Машгиз, 1964. – 180 с.

7. Petunin, A.A., Polishuk, E.G., Chentsov, A.G., Chentsov, P.A., Ukolov, S.S. About some types of constraints in problems of routing. [Электронный ресурс] URL: <http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4968494>

8. Анахов, С.В. Принципы и методы проектирования плазмотронов. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. – 165 с.

9. Anakhov, S.V., Guzanov, B.N., Matushkin, A.V., Pugacheva, N.B., Pykin, Yu.A. Influence of plasma torch design on cutting quality during precision air-plasma cutting of metal // Steel in Translation. – 2020. – Vol. 50. – №3. – PP. 159-165.

REFERENCES

1. Rybakov, V.M. Welding and cutting of metals. - M.: Higher School, 1979, 214 p.
2. Glizmanenko, D.L. Gas welding and metal cutting. - M.: Higher School, 1969, 304 p.
3. Ovchinnikov, V.V. Technology of gas welding and metal cutting. - M.: Publishing Center Academy, 2016, 240 p.
4. Deformations during oxygen cutting. Electronic resource URL: https://metallischekiy-portal.ru/articles/svarka/gazovaya_rezka/deformacii_pri_kislorodno_i_rezke
5. Petunin, A.A. On some strategies for forming the route of an instrument in the development of control programs. Vestnic UGATU, 2009, Vol. 13, no. 2, pp. 280-286.
6. Trochun, I.P. Internal forces and deformations during welding. - M.: Mashgiz, 1964, 180 p.
7. Petunin, A.A., Polishuk, E.G., Chentsov, A.G., Chentsov, P.A., Ukolov, S.S. About some types of constraints in problems of routing. Electronic resource, URL:<http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4968494>
8. Anakhov, S.V. Principles and methods of designing plasma torches. Yekaterinburg: Publishing House of the State Vocational-Professional University, 2018, 165 p.
9. Anakhov, S.V., Guzanov, B.N., Matushkin, A.V., Pugacheva, N.B., Pykin, Yu.A. Influence of plasma torch design on cutting quality during precision air-plasma cutting of metal, Steel in Translation, 2020, Vol. 50, no 3, pp. 159-165.

Рецензент д.т.н.
Виктор Васильевич Овчинников