

ТЕХПОДДЕРЖКА №16

Термическая резка стали Hardox® и Strenx®

Резка стали Hardox® и Strenx®

Износостойкая листовая сталь Hardox® и высокопрочная сталь Strenx® отличаются исключительной чистотой. Эта особенность, наряду с низким содержанием легирующих элементов, значительно облегчает резку этой стали. Сталь марок Hardox® и Strenx® поддается термической резке всеми способами, включая кислородную, плазменную и лазерную. Разумеется, можно применять также механическую резку.

Рекомендации издания «Техподдержка №16» касаются, прежде всего, термической резки и представлены в трёх разделах, посвящённых кислородной, плазменной и лазерной резке.

Механическая резка, вырубка и пробивка применяются только для более мягких марок стали Hardox® (400 и 450) и для всех марок стали Strenx® умеренной толщины. Для стали Hardox® и Strenx®, независимо от толщины, может применяться гидроабразивная резка, которая является одним из методов безогневой резки стали.

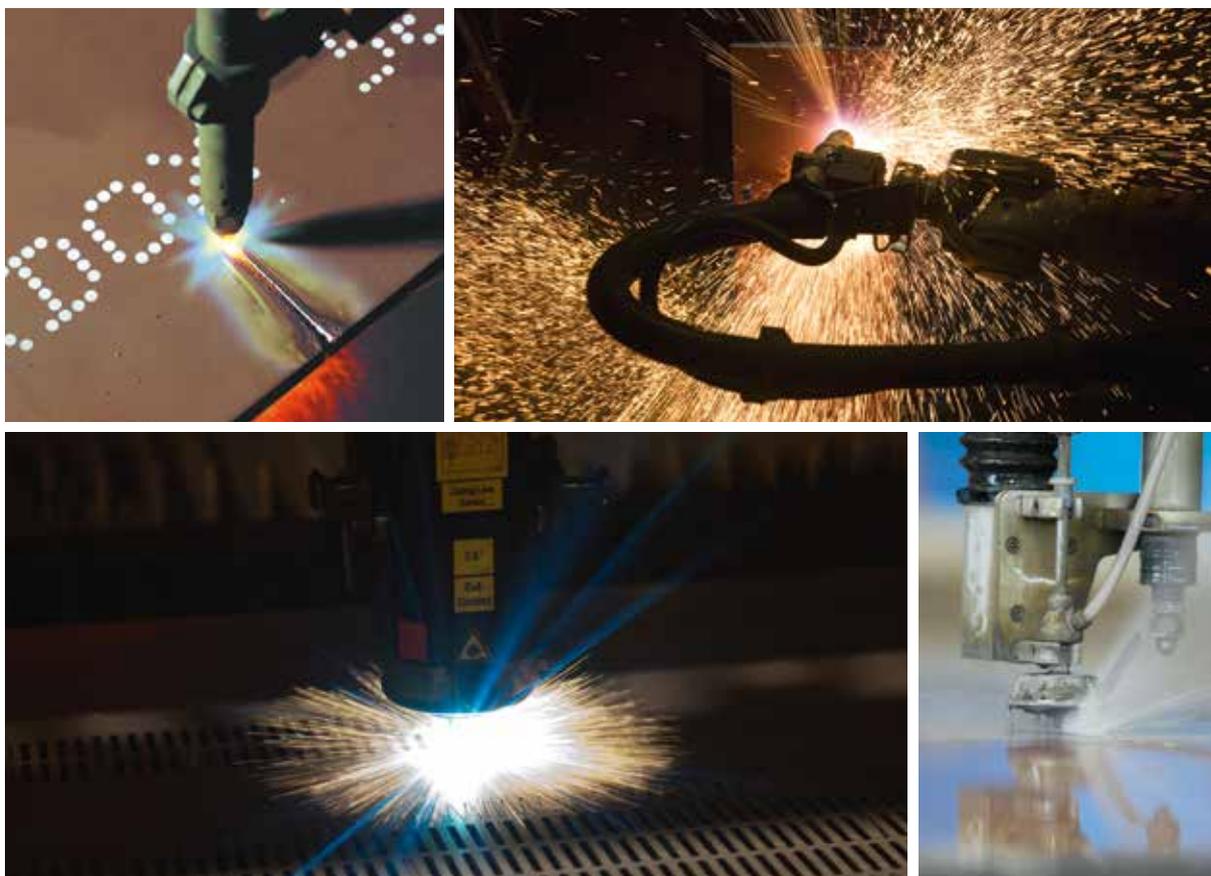


РИСУНОК 1. Начиная сверху слева: кислородная, плазменная, лазерная, гидроабразивная резка.

Процесс термической резки стали Hardox® и Strenx® ненамного отличается от резки обычной стали. Этому способствует намного меньшее количество неметаллических включений по сравнению с обычной мягкой сталью. Тем не менее, во время резки толстолистовой стали Hardox® необходимо учитывать риск образования трещин на кромке. Поскольку Strenx® и Hardox® принадлежат семейству закалённых и отпущенных материалов, они реагируют на термическую резку иначе, чем обычная низколегированная сталь. Термообработанная сталь склонна к отпуску зоны теплового воздействия, в некоторых случаях имеется также риск растрескивания кромок. Следуя приведённым ниже указаниям и рекомендациями, выполнить термическую резку стали Hardox® и Strenx® можно при помощи обычного оборудования. Более подробная информация опубликована компанией SSAB в справочнике по сварке.

Растрескивание кромок

Феномен растрескивания кромок имеет общий характер с водородным растрескиванием сварных швов и происходит при использовании термической резки. Возникшие на кромке трещины становятся заметны от 48 часов до нескольких недель после выполнения резки. Таким образом растрескивание кромок можно считать процессом, возникающим с задержкой. Риск водородного растрескивания возрастает при увеличении твёрдости и толщины листа. Ниже приводится информация о том, как уменьшить риск растрескивания кромок.

Растрескивание кромок тесно связано с содержанием водорода и присутствием в стальном листе остаточных напряжений. Поэтому может быть полезным уменьшение содержания водорода и остаточных напряжений. Сделать это можно различными способами:

1. Предварительный нагрев материала
2. Последующая термообработка
3. Уменьшение скорости резки
4. Сочетание предварительного нагрева, последующей термообработки и уменьшения скорости резки с длительным охлаждением околошовной зоны

Предварительный нагрев

Избежать водородного растрескивания по кромкам можно, выполняя резку предварительно нагретого материала. Предварительный нагрев рекомендуется применять перед кислородной и плазменной резкой с использованием кислорода.

Для всех типов лазерной, а также плазменной резки с использованием азота предварительный нагрев не рекомендуется из-за негативного влияния на качество кромок.

В зависимости от ситуации, можно нагреть весь лист либо его часть. Для этого используются:

- нагревательная печь,
- горелка,
- электрические маты

По причине равномерного распределения температуры рекомендуемым способом является нагрев в печи. Для подогрева листовых стали Hardox® и Strenx® можно использовать

также горелку, см. **рисунок 3**. Важно постоянно перемещать горелку, чтобы температура листа не превосходила максимально допустимую. Затем на стороне, противоположной стороне нагрева, измеряется температура.

Использование электрических матов является достаточно медленным методом: практика показывает, что нагревать заготовку до 150-200°C лучше на протяжении ночи, чтобы утром выполнить резку.

Последующая термообработка

Последующая термообработка является зарекомендовавшим себя методом, который позволяет избежать растрескивания. Для термообработки можно использовать печи или горелки. Горелки – более простое решение, поскольку печи меньше распространены в промышленности. Важно, чтобы последующая термообработка была выполнена как можно скорее после резки. Начать термообработку следует не позднее чем через 30 минут после начала резки. Нельзя перегревать материал.

При использовании печи лист должен находиться в ней до достижения максимальной температуры, указанной в **таблице 2**, однако она не должна быть превышена. Время нагрева зависит от толщины листа, как правило, это 5 минут для каждого миллиметра толщины, т.е. 10-миллиметровый лист требуется нагревать на протяжении 50 минут.

При использовании горелок (**рисунок 4**) важно исключить перегрев. Температура кромок не должна превышать 700°C. Как правило, последующая термообработка с помощью горелок осуществляется вручную. В таких условиях чрезвычайно важно знать, как контролировать температуру. Контроль осуществляется по цвету обрезной кромки – материал требуется разогреть до тёмно-красного цвета, он должен только начинать светиться. Если материал раскалился до тёмно-оранжевого цвета или цвета яркого красного вина, значит температура слишком высокая, и нагрев желаемого результата не принесёт. В этом случае термообработку необходимо повторить.

При ярком освещении (например, вне помещения в солнечную погоду) определить температуру сложнее, поэтому рекомендуется проводить последующую термообработку в помещении.

Уменьшение скорости резки

При уменьшении скорости резки материал нагревается вокруг точки реза и зона теплового воздействия становится шире. В результате изменяются остаточные напряжения, что уменьшает риск растрескивания кромки. Следует учесть, что метод уменьшения скорости резки менее эффективен, чем предварительная или последующая термообработка, и должен использоваться в качестве альтернативы, если не доступно оборудование для термообработки.

При использовании данного метода скорости резки не должна превышать указанную в этом документе, иначе риск образования трещин не изменится.

Медленное охлаждение

Независимо от того, используется ли предварительный нагрев компонентов, медленное охлаждение уменьшает риск растрескивания кромки. Медленного охлаждения можно добиться,

сложив вместе нагретые в процессе резки компоненты и накрыв их термоизолирующим покрытием. Затем следует медленно охладить компоненты до комнатной температуры.

Концентраторы напряжений

Острые углы действуют как концентраторы напряжений. Поскольку водородное растрескивание тесно связано с остаточными напряжениями, острые углы повышают риск образования трещин. Эта зависимость действительна для всех методов термической и безогневой резки, в том числе, гидроабразивной. Уменьшить риск растрескивания можно следующими мерами.

1. По возможности избегать острых внутренних углов
2. По возможности использовать гладкую геометрию
3. Если острых углов избежать нельзя, в области внешнего угла следует сделать петлю.
4. Если резку требуется прекратить (например, на ночь), необходимо сделать чистовой проход, чтобы убрать концентраторы напряжения.

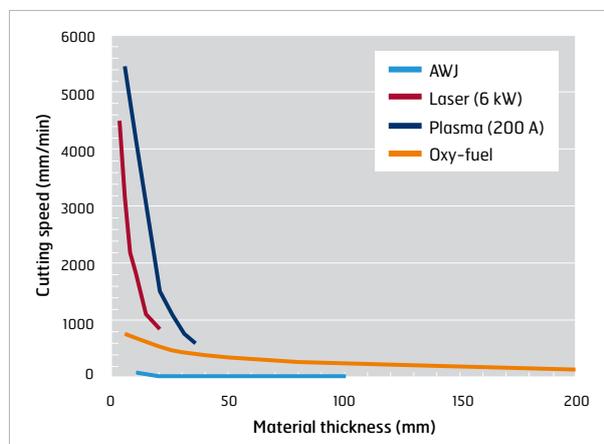


РИСУНОК 2. Скорость различных методов резки в зависимости от толщины материала



РИСУНОК 3. Горелка для предварительного нагрева



РИСУНОК 4. Последующая термообработка вручную

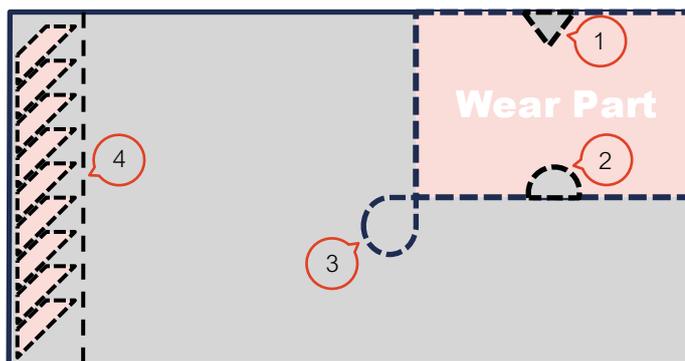


РИСУНОК 5. Методы недопущения острых углов

Кислородная резка

Сталь Hardox® Strenx® легко поддается кислородной резке. Этот метод практически не имеет ограничений в отношении толщины материала, т.е. допускается резка материала толщиной до 1000 мм. Хотя обрабатывать можно относительно тонкие заготовки, толщина материала обычно превосходит 20 мм. Общие характеристики кислородной резки представлены в **таблице 1**. Часто встречается неверное мнение, что для резки твердой стали требуется более высокое давление кислорода. Являясь термическим процессом, кислородная резка не зависит от твердости стали. Сталь Hardox® и Strenx® отличается высоким уровнем чистоты и низким содержанием легирующих элементов, что значительно облегчает её резку.

Hardox®

Предварительный нагрев

Рекомендации по предварительному нагреву материала для кислородной резки представлены в **таблице 2**.

Последующая термообработка

Как упоминалось в разделе о растрескивании кромок, для уменьшения риска возникновения трещин рекомендуется использовать последующую термообработку материала. В случае последующей термообработки в печи следует соблюдать значения максимальной температуры, приведённые в **таблице 2**. Заготовка должна оставаться в печи до достижения необходимой температуры (**см. таблицу 2**).

Если последующая термическая обработка осуществляется с помощью горелки, материал нельзя нагревать более чем на 700 °С. На практике это означает, что материал должен раскалиться до тёмно-красного цвета (крово-красного или цвета очень тёмного красного вина), см. схему на **рисунке 6**.

Кроме того, важно, чтобы последующая термообработка была выполнена как можно скорее после завершения резки. Начать термообработку следует не позднее чем через 30 минут после начала резки.

Уменьшение скорости резки

При уменьшении скорости резки материал нагревается вокруг точки реза и зона теплового воздействия становится шире. В результате изменяются остаточные напряжения, что уменьшает риск растрескивания кромок. Следует

учесть, что метод уменьшения скорости резки менее эффективен, чем предварительная или последующая термообработка, и должен использоваться в качестве альтернативы, если не доступно оборудование для термообработки.

Если уменьшение скорости является единственной доступной мерой по предупреждению растрескивания, скорость не должна превосходить максимальную скорость резки, указанную в **таблице 3**. Не следует использовать слишком большие сопла (например, для листовой стали толщиной 50 мм рекомендуется сопло 25-50 мм вместо 50-100 мм).

Для обеспечения высокого качества отрезной кромки давление кислорода должно быть уменьшено. Насколько требуется уменьшить давление, зависит от типа и размера сопла. Корректируя давление кислорода, необходимо всегда выполнять пробный проход, чтобы обеспечить высокое качество кромок.

Температура подлежащего резке материала должна быть как можно более высокой. Во время холодного сезона перед резкой заготовки следует заблаговременно привезти в цех.

Strenx®

Большинство марок стали Strenx® умеренной толщины отличаются достаточно высоким сопротивлением по отношению к водородному растрескиванию. Поэтому такие дополнительные меры, как предварительный нагрев для предотвращения трещин не требуются. Однако в случае резки стали Strenx® 700-960 толщиной более 80 мм и Strenx® 1100 толщиной более 30 мм риск растрескивания кромок возрастает. Уменьшить риск образования трещин можно путём предварительного нагрева, последующей термообработки или уменьшения скорости резки.

Для стали Strenx® 700-960 оптимальная температура предварительного нагрева – 150°C, для стали Strenx® 1100 – немного ниже 150°C.

При использовании предварительного нагрева температура не должна превышать значения, приведённые в **таблице 4**.

Для последующей термообработки стали Strenx® см. выше информацию о термообработке материала Hardox®.

Параметры медленной резки стали Strenx® 700-960 такие же, как и для Hardox® HiTuf, в случае стали Strenx® 1100 см. параметры Hardox® 450.

Метод резки	Ширина разреза	Отпущенная зона	Допуски по размерам
Кислородная резка	2-5 мм	4-10 мм	± 2,0 мм

ТАБЛИЦА 1. Общие характеристики кислородной резки

Материал	Макс. темп. предв. нагрева (°C)
Strenx® 700	300
Strenx® 900	300
Strenx® 960	300
Strenx® 1100	150
Strenx® 1300	150

ТАБЛИЦА 4. Максимальная рекомендуемая температура предварительного нагрева.



РИСУНОК 6. Цвет кромки в процессе последующей термообработки горелкой.

Марка	Толщина листа	Мин. температура предварительного нагрева (°C)	Макс. температура предварительного нагрева (°C)
Hardox® HiTemp	5–51 мм	Без предварительного нагрева	500
Hardox® HiTuf	< 90 мм ≥ 90 мм	Без предварительного нагрева 100	300
Hardox® 400	< 45 мм 45–59,9 мм 60–80 мм > 80 мм	Без предварительного нагрева 100 150 175	225
Hardox® 450	< 40 мм 40–49,9 мм 50–69,9 мм ≥ 70 мм	Без предварительного нагрева 100 150 175	225
Hardox® 500	< 25 мм 25–49,9 мм 50–59,9 мм ≥ 60 мм	Без предварительного нагрева 100 150 175	225
Hardox® 550	< 20,1 мм 20,1–51 мм > 51 мм	Без предварительного нагрева 150 170	200
Hardox® 600	< 12 мм 12–65 мм	Без предварительного нагрева 175	180
Hardox® Extreme*	8–19 мм	100	100

ТАБЛИЦА 2. Температура предварительного нагрева стали Hardox® при использовании метода кислородной резки.

*Компания SSAB рекомендует гидроабразивную резку. Если доступна только кислородная резка, см. рекомендации в таблице 2.

ТАБЛИЦА 3. Максимальная скорость резки (мм/мин) при использовании кислородной резки без предварительного нагрева.

Уменьшение скорости резки не является абсолютной гарантией отсутствия водородных трещин для стали Hardox® extreme. Если доступна только кислородная резка, следует использовать предварительный нагрев и последующую термообработку горелкой.

Макс. толщина листа	Hardox® HiTemp	Hardox® HiTuf	Hardox® 400	Hardox® 450	Hardox® 500	Hardox® 550	Hardox® 600	Hardox® Extreme
12 мм	без ограничений	**						
15 мм	без ограничений	300	**					
20 мм	без ограничений	200	**					
25 мм	без ограничений	без ограничений	без ограничений	без ограничений	300	270	180	
30 мм	без ограничений	без ограничений	без ограничений	без ограничений	250	230	150	
35 мм	без ограничений	без ограничений	без ограничений	без ограничений	230	190	140	
40 мм	без ограничений	без ограничений	без ограничений	230	200	160	130	
45 мм	без ограничений	230	230	200	170	140	120	
50 мм	без ограничений	210	210	180	150	130	110	
60 мм		200	200	170	140	*	*	
70 мм		190	190	160	135	*	*	
80 мм		180	180	150	130			
>80 мм		*	*	*	*			

*Возможен только предварительный нагрев **Компания SSAB рекомендует гидроабразивную резку.

Плазменная резка

Сталь Hardox® и Strenx® легко поддается плазменной резке. Плазменная резка имеет ограничения по толщине материала. Как правило, осуществляется резка изделий толщиной до 50 мм (в зависимости от оборудования). Общие характеристики плазменной резки представлены в **таблице 5**.

На **рисунке 7** приведена скорость плазменной резки в зависимости от толщины материала и мощности.

Сталь Hardox® и Strenx®

Плазменная резка материалов Hardox® и Strenx® не отличается от резки обычной стали и осуществляется с использованием тех же технологических параметров. Для плазменной резки большинства марок стали Hardox® и Strenx® предварительная или последующая термообработка с целью усиления миграции водорода из околшовной зоны не требуется. Чтобы не допустить растрескивания кромок, сталь Hardox® 600 и Hardox® Extreme должна быть подвергнута предварительной или последующей термообработке, см. рекомендации по кислородной резке.

Метод резки	Ширина разреза	Отпущенная зона	Допуски по размерам
Плазменная резка	2-6,5 мм	2-5 мм	± 1,0 мм

ТАБЛИЦА 5. Общие характеристики плазменной резки

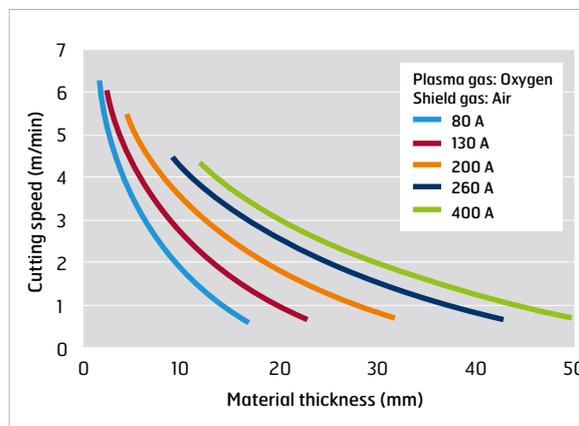


РИСУНОК 7. Стандартная скорость плазменной резки при использовании различных источников энергии

Лазерная резка

Лазерная резка стали Hardox® и Strenx® проходит без сложностей при использовании стандартных технологических параметров для материала данной толщины. В зависимости от используемого оборудования, максимальная толщина составляет около 25 мм. Как правило, осуществляется резка листов толщиной до 15 мм. Общие характеристики лазерной резки представлены в **таблице 6**.

Лазерная резка быстрее кислородной и обеспечивает более высокое качество кромки по сравнению с плазменной. На **рисунке 8** приведена скорость резки в зависимости от толщины материала и мощности лазера.

По причине относительно невысокой толщины и небольшого термического воздействия лазерной резки предварительный нагрев стали Hardox® и Strenx® с целью усиления миграции водорода из околшовной зоны не требуется. Кроме того, предварительный нагрев ухудшит качество кромки.

Сталь Hardox® и Strenx®

Лазерная резка материалов Hardox® и Strenx® не отличается от резки традиционной мягкой стали и осуществляется с использованием тех же технологических параметров. Грунтовочный слой уменьшает скорость процесса. Решить эту проблему можно за счёт предварительного прожига грунтовки, затем можно резать на обычной скорости.

Метод резки	Ширина разреза	Отпущенная зона	Допуски по размерам
Лазерная резка	< 1 мм	0,2-2 мм	± 0,2 мм

ТАБЛИЦА 6. Общие характеристики лазерной резки

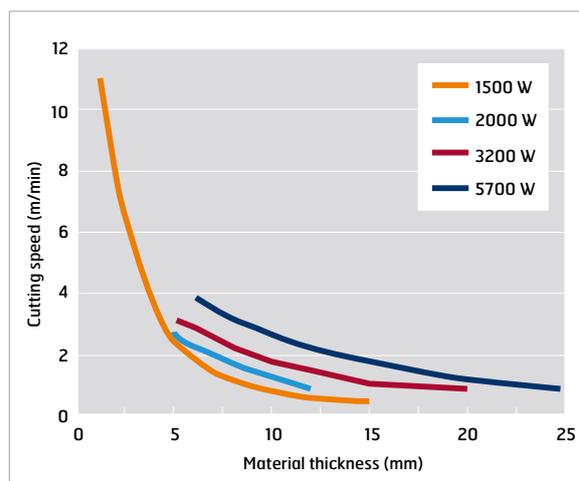


РИСУНОК 8. Скорость лазерной резки

Твёрдость зоны теплового воздействия

Свойства зоны теплового воздействия зависят от следующих аспектов:

- была ли сталь отпущена во время производства, если была, каким образом это происходило;
- химический состав стали;
- воздействие температуры, образующейся в процессе резки

Ширина зоны теплового воздействия увеличивается вместе с увеличением тепловложения во время резки. Например, уменьшение скорости при одинаковом расходе энергии ведёт к увеличению зоны теплового воздействия. Различные методы термической резки оказывают различное воздействие на материал, образуя более широкую или узкую отпущенную зону. Кислородная резка оказывает наибольшее термическое воздействие на материал, в порядке убывания за ней идут плазменная и лазерная резка. **На рисунке 9** схематически представлена зона теплового

воздействия стали марок Strenx® 1100 – Strenx® 1300 и Hardox® 400 – Hardox® Extreme.

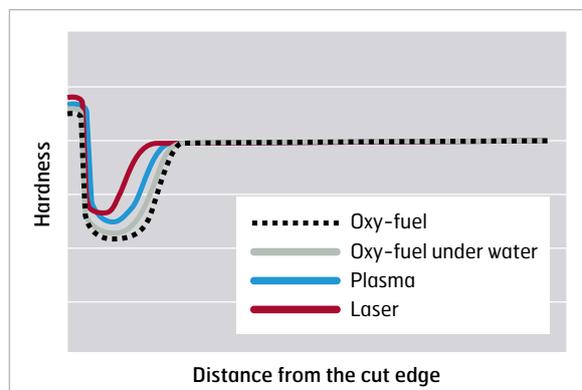


РИСУНОК 9. Твёрдость околошовной зоны профиля при использовании различных методов термической резки для стали Hardox® и Strenx®.

Хранение листовой стали

Во время хранения сталь Hardox® 550, Hardox® 600 и Hardox® Extreme не должна подвергаться трёхточечномугибающему усилию, которое может возникнуть, если листы уложены с использованием неровно расположенного прокладочного материала. Используемые для разделения слоёв элементы должны всегда находиться один над другим.

Нельзя возвращать на хранение лист с острыми углами, поскольку они являются концентраторами

напряжения и со временем могут вызвать растрескивание материала. Прежде чем вернуть лист на склад, необходимо всегда выполнять чистовой проход, чтобы удалить острые углы. Это действительно для всех методов термической и безогневой резки, в том числе, гидроабразивной. Особенно важно соблюдать данное условие для стали марок Hardox® 550, Hardox® 600 и Hardox® Extreme.



РИСУНОК 10. Надлежащим образом хранящийся стальной лист

Уменьшение риска отпуска кромок

Стойкость к отпуску кромок зависит от химического состава, микроструктуры и способа обработки материала. Чем меньше размер подвергнутой термической резке детали, тем больше риск того, что вся деталь будет отпущена. При чрезмерном повышении температуры твёрдость стали понижается в соответствии с графиком на **рисунке 11**. Данные максимально допустимой температуры приведены в **таблицах 2 и 4**.

Метод резки

При работе с деталями малого размера материал аккумулирует тепло, полученное в процессе резки и предварительного нагрева. Чем меньше размер разрезаемой детали, тем больше риск отпуска. В случае кислородной резки листовой стали толщиной более 30 мм, как правило, риск потери твёрдости всего компонента возникает, если расстояние между швами составляет менее 200 мм. Использование безогневых методов резки (например, гидроабразивной) наиболее эффективно уменьшает риск отпуска. Если необходимо выполнить резку термическим методом, вместо кислородной резки следует отдать предпочтение лазерной или плазменной. В процессе кислородной резки температура детали повышается за счёт получения большего количества тепла.

Погружная резка

Водяное охлаждение материала и поверхности реза эффективно ограничивает и уменьшает отпуск стали в процессе резки. Для этого можно погрузить листовую сталь в воду (**рисунк 12**) либо распылить на неё воду в процессе и после резки. Погружным способом может осуществляться как плазменная, так и кислородная резка.

Преимущества погружной резки

- Предотвращение потери твёрдости всем компонентом
- Уменьшение коробления
- Охлаждение деталей сразу после резки
- Отсутствие дыма и пыли
- Низкий уровень шума

Поскольку предварительный нагрев не проводится в случае погружной резки, доступными мерами предотвращения водородного растрескивания остаются последующая термообработка и уменьшение скорости резки. При вырезании из толстолистовой стали Hardox® деталей малого размера имеется риск потери твёрдости и растрескивания кромок. Избежать этого можно за счёт применения погружной резки на небольшой скорости либо путём последующей термообработки. Для термообработки может использоваться горелка либо печь.

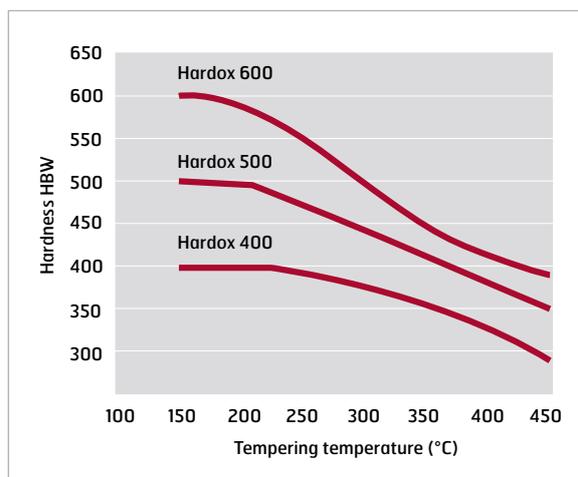


РИСУНОК 11. Твёрдость поверхности и температура отпуска



РИСУНОК 12. Погружная резка