

УДК621.791

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛОВ

А.В. Сумец, асп., В.Д. Кассов, проф., д.т.н.,

Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

Аннотация. Исследованы особенности фазных и структурных превращений при термической резке сталей. Приведено влияние способа резки на глубину оплавленного и переходного участков. Описаны явления, связанные с процессом затвердевания после резки. Детально рассмотрено влияние скорости охлаждения на структуру металлов в зоне резки.

Ключевые слова: термическая резка, зона термического влияния, скорость резки, структура.

ЗАКОНОМІРНОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ПІД ЧАС ТЕРМІЧНОГО РІЗАННЯ МЕТАЛІВ

А.В. Сумец, асп., В.Д. Кассов, проф., д.т.н.,

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

Анотація. Досліджено особливості фазних і структурних перетворень у процесі термічного різання сталей. Наведено вплив способу різання на глибину оплавленої та перехідної ділянок. Описано явища, що пов'язані з процесом затвердіння після різання. Детально розглянуто вплив швидкості охолодження на структуру металів у зоні різання.

Ключові слова: термічне різання, зона термічного впливу, швидкість різання, структура.

REGULARITIES OF THE STRUCTURE FORMATION OF THE THERMAL ZONE DURING THERMAL CUTTING OF METAL

A. Sumets, P. G., V. Kassov, Prof., D. Sc. (Eng.),

Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk

Abstract. The features of phase and structural transformations during thermal cutting of steel are investigated. The influence of the cutting method on the depth of the melted and transition sections is given. The phenomena connected with the process of solidification after cutting are described. The influence of the cooling rate on the structure of metal in the cutting zone is considered.

Key words: thermal cutting, thermal zone, cutting velocity, structure.

Введение

Структурные превращения в условиях термической резки металла (аргоно-плазменной, воздушно-плазменной и кислородно-флюсовой) значительно отличаются от превращений при обычной термической обработке [1, 2]. Данные отличия объясняются, прежде всего, спецификой термодеструкционного цикла резки [3]. В условиях термической резки распад твердых растворов в зоне резки протекает

в более сложной и непрерывно изменяющейся обстановке, а наличие химической неоднородности в зоне термического нагрева во многих случаях коренным образом изменяет кинетику распада твердых растворов [4, 5]. Поэтому процессы кристаллизации металла и структурные превращения в зоне резки в большинстве случаев определяют дальнейшие технологические и эксплуатационные свойства металла.

Анализ публикаций

С процессом затвердевания металла после резки связаны многие нежелательные явления, в том числе и формирование химической неоднородности [1, 6–9]. Микроскопическая химическая неоднородность, имеющая место в зоне термической резки, в первую очередь определяется характером первичной кристаллизации стали и зависит от количества и природы легирующих элементов, примесей и условий охлаждения [7–12].

Цель и постановка задачи

Целью работы является исследование особенностей фазовых и структурных превращений в металле при термической резке.

Материал и методика исследований

При неравновесной кристаллизации диффузия не будет успевать выравнивать состав внутренних и наружных слоев твердого раствора. Таким образом, после охлаждения подвергнутая резке сталь, скорее всего, будет иметь неоднородный или слоистый состав. В таких условиях кристаллизации, если легирующий элемент или примесь имеет в жидкой фазе большую растворимость, чем в твердой, будет иметь место обогащение междоусного и междендритного пространства. Дендритная неоднородность хорошо выявляется на микроструктуре металла после термической резки в виде поверхностного рельефа. При очень большом обогащении в междоусных и междендритных пространствах на последних стадиях кристаллизации наблюдаются неравновесные структуры (рис. 1).



Рис. 1. Микроструктура оплавленного участка стали У10 ($\times 250$) после аргоно-плазменной (а), воздушно-плазменной (б) и кислородно-флюсовой резки (в)

Способность элемента обогащать междоусные и междендритные промежутки характеризуется коэффициентом распределения K , представляющим собой отношение растворимостей элемента в твердой и жидкой фазах: $C_{ТВ}/C_{Ж}$.

В нашем случае исследований особый интерес представляют процессы, протекающие в зоне резки (термического нагрева/плавления), от структуры и химического состава которой зависят свойства зоны термической резки. Аналитическое выражение процесса диффузии на границе сплавления для оценки распределения в ней легирующих элементов и примесей в зависимости от коэффициента диффузии в твердой D_T и жидкой $D_{Ж}$ фазах, продолжительности процесса X и коэффициента распределения K в нашем случае имеют следующий вид:

$$C_T = C_{T_0} - \frac{C_{T_0} - K \cdot C_{Ж_0}}{K \cdot \frac{D_T}{D_{Ж}} + 1} + 1 + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{2 \frac{x}{D_T}} e^{-y^2} dy, \quad (1)$$

$$C_{Ж} = C_{Ж_0} - \frac{C_{T_0} - K \cdot C_{Ж_0}}{K \cdot \frac{D_T}{D_{Ж}} + 1} + 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{2 \frac{x}{D_T}} e^{-y^2} dy, \quad (2)$$

где C_{T_0} и $C_{Ж_0}$ – начальные концентрации элементов в твердой и жидкой фазах; y – расстояние от межфазной границы раздела вглубь жидкого металла в процессе резки.

Неравновесная концентрация атомов примесей и легирующих элементов, являющаяся следствием повышенных скоростей охлаждения в результате резки, способствует значительному упрочнению металла (табл. 1, 2).

Таблица 1 Влияния способа резки на глубину термически обработанных слоев

Глубина термически обработанных слоев, мм		Марки стали										
		3 сп.	40	У10	09Г2С	40Х	30Х13	Х12МФ	30ХМА	25Х1МФ	08Х18Н10Т	03Х17Н14М3
Аргано-плазменная	ОУ	0,08	0,45	0,10	0,08	0,04	0,15	0,40	0,20	0,13	0,35	0,90
	ПУ	2,00	3,00	2,50	1,70	2,30	1,05	0,40	0,70	1,10	2,10	1,60
	Σ	2,08	3,45	2,60	1,78	2,034	1,20	0,80	0,90	1,23	2,45	2,50
Воздушно-плазменная	ОУ	0,18	0,80	0,10	0,15	0,15	0,08	0,35	0,15	0,13	0,14	0,40
	ПУ	1,50	0,60	1,80	0,60	1,50	0,13	0,15	0,10	1,60	1,03	1,04
	Σ	1,68	1,40	1,90	0,75	1,65	0,21	0,50	0,25	1,73	1,17	1,44
Кислородно-флюсовая	ОУ	0,10	0,25	0,05	0,50	0,40	0,13	0,58	0,15	0,18	0,43	2,72
	ПУ	1,50	7,00	1,40	2,00	1,70	2,15	1,70	3,20	1,70	4,30	3,30
	Σ	1,60	7,025	1,45	2,50	2,10	2,28	2,28	3,35	1,88	4,73	6,02

Примечание: ОУ – глубина оплавленного участка, мм; ПУ – глубина переходного участка, мм; Σ – сумма ОУ и ПУ.

Таблица 2 Влияние способа резки на микротвердость

Микротвердость, кг/мм ²		Марки стали										
		3 сп.	40	У10	09Г2С	40Х	30Х13	Х12МФ	30ХМА	25Х1МФ	08Х18Н10Т	03Х17Н14М3
Аргано-плазменная	ОУ	420	572	900	383	514	724	724	385	350	383	380
	ПУ	290	350	510	270	260	640	642	350	240	236	297
	ОМ	180	263	330	210	226	270	350	227	232	220	254
Воздушно-плазменная	ОУ	170	572	420	193	420	824	950	383	350	272	254
	ПУ	220	322	380	200	380	640	642	383	237	274	254
	ОМ	180	263	330	210	226	270	350	227	232	220	254
Кислородно-флюсовая	ОУ	193	322	824	181	464	642	724	383	420	383	274
	ПУ	210	275	500	160	350	724	946	350	382	279	274
	ОМ	180	263	330	210	226	270	350	227	232	220	254

Примечание: ОУ – глубина оплавленного участка, мм; ПУ – глубина переходного участка, мм; ОМ – основной металл.

Увеличение скорости охлаждения в интервале кристаллизации способствует измельчению первичной структуры металла в зоне резки, особенно для легированных сталей. Металл, образовавшийся в результате термической резки на среднелегированных сталях, охлаждённых с повышенными скоростями, по механическим свойствам значительно превосходит основной металл. По-видимому, изменение механических свойств происходит не только в результате измельчения первичной структуры, но также ослабления степени химической неоднородности, определяемой соотношением концентраций элементов в ликвационной межкристаллитной прослойке и в теле столбчатого кристаллита. Таким образом, скорее всего, зависимость изменения

свойств металла в зоне термической резки от скорости охлаждения определяется изменениями не степени ликвации, а главным образом, размеров столбчатых кристаллитов и ширины обогащённых межкристаллитных границ. В результате термической резки установлено образование условных участков, начиная от зоны плавления до основного металла. Металл зоны участка плавления (первый участок) имеет сравнительно небольшую ширину (0,04–0,40 мм) и заметно отличается от соседних участков основного металла. Эти изменения вызваны, прежде всего, диффузионными процессами, протекающими в процессе резки в зоне плавления. Направление диффузии элемента определяется коэффициентом распределения в твёрдой и жидких

фазах, а также содержанием элемента в основном металле. В зависимости от соотношения этих величин диффузия элемента может происходить из основного металла в зону плавления или расплавленного металла в основной металл. Второй участок содержит крупные зёрна. В него входит металл, который нагревался от температуры около 1200 °С до температуры плавления основного металла. Ширина его изменяется в пределах 0,6–4,3 мм. При нагреве металл претерпевает $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение. По мере перегрева выше температуры A_{c3} аустенитное зерно растёт и даже при незначительной продолжительности пребывания в условиях высоких температур успевает вырасти до значительных размеров. Тип структуры, образующейся в участке перегрева, зависит от характера термического процесса резки и состава металла. Так, в некоторых случаях в этом участке формируется видманштеттова структура. В легированных сталях участки металла, нагревающиеся при резке выше температуры A_{c3} , в результате быстрого охлаждения приобретают структуры закалки. Однако структура зоны по ширине от участка сплавления до участка, имевшего при резке максимальную температуру только несколько выше A_{c3} , будет одинаковой. В результате распада крупных аустенитных зёрен в участках, прилегающих к границе сплавления и нагревающихся при резке выше 1200 °С, образуется более крупнопластинчатый мартенсит, чем в участках металла, нагревающихся при резке выше A_{c3} . Структура зоны сплавления является почти такой же, как и структура участка перегрева.

Следующий участок – участок перекристаллизации. Он включает металл, нагретый от температуры, несколько выше температуры $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, до 1100–1150 °С. Ширина данного участка 0,7–1,0 мм. В низкоуглеродистых и низколегированных сталях в участке перекристаллизации обычно образуется мелкодисперсная (зернистая) структура, характеризующаяся в целом достаточно высоким комплексом механических свойств. В средне- и высоколегированных сталях в металле данного участка часто образуется мелкопластинчатый мартенсит или смесь мартенсита и продуктов промежуточного превращения, т.е. те же структуры, что и в участке перегрева, но более дисперсные. Следующий, четвёртый, участок включает в себя металл, нагретый от температур A_{c1} до тем-

пературы A_{c3} . Металл участка подвергается только частичной перекристаллизации, и поэтому его можно назвать участком неполной перекристаллизации. Металл этого участка в низкоуглеродистых и низколегированных сталях характеризуется почти неизменяющимся ферритным зерном, и некоторым дроблением и сфероидизацией перлитных участков. В средне- и высоколегированных сталях после охлаждения формируется структура частичной закалки.

Следующий участок – пятый – можно назвать участком рекристаллизации. Он включает металл, который нагревался от 500 °С до температур несколько ниже A_{c1} . Отдельные участки данной зоны, нагревавшиеся ниже A_{c1} , по своей структуре и свойствам могут быть различными в зависимости от исходного состояния металла перед термической резкой. Если металл перед резкой подвергался холодной пластической деформации, то при нагреве до температур ниже A_{c1} происходит рекристаллизация, приводящая к значительному росту зерна.

Шестой участок включает металл, который нагревался в интервале температур 100–500 °С. Этот участок в процессе резки не претерпевает видимых структурных изменений.

Высоколегированные аустенитные стали не претерпевают видимых фазовых превращений в условиях термического воздействия на них при резке. Вследствие этого зона термического нагрева этих сталей имеет менее сложное строение, чем зона при резке обычных конструкционных сталей. Размер зоны сплавления высоколегированных сталей сравнительно невелик и определяется температурным градиентом и интервалом кристаллизации. Если температурный градиент мал, а интервал кристаллизации сравнительно велик, то ширина зоны сплавления возрастает. Свойства зоны термического воздействия при резке неразрывно связаны с состоянием границ зёрен в ней. В зоне термического воздействия под влиянием термического цикла резки происходит энергичный рост зёрен, а также подплавление границ в зоне сплавления и последующее развитие в ней химической микронеоднородности. В связи с этим по границам зёрен локализуются различного рода разрушения, что обуславливает существенное влияние их на механические свойства. В зоне сплавления образуются границы

двух типов – первичные и вторичные. Первичные границы формируют более мелкие зёрна, вторичные (тонкие) крупные зёрна. Первичные и вторичные границы, как правило, расположены по отношению друг к другу произвольно. Первичные границы содержат повышенное количество легирующих элементов [13-16], причём уровень химической неоднородности сопоставим с дендритной неоднородностью, развивающейся при кристаллизации зоны сплавления. Это даёт основание полагать, что первичные границы возникают вследствие образования и последующего затвердевания жидкой фазы.

Выводы

Проведенные исследования особенностей структурообразования зоны термического влияния, образующейся при аргоно-плазменной, воздушно-плазменной и кислородно-флюсовой резки металлов 11 марок стали, показали, что наиболее эффективным и целесообразным является воздушно-плазменная резка.

Литература

1. Эсибян Э. М. Воздушно-плазменная резка: состояние и перспективы / Э.М. Эсибян // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 6–20.
2. Голобородько Ж.Г. Влияние плазмообразующей среды при резке на образование пор при сварке судовых корпусных сталей / Ж.Г. Голобородько, В.В. Квасницкий // 36. науч. праць УДМТУ. – 2002. – № 5 (383). – С. 25–31.
3. Пашенко В.М. Плазмові різання з використанням складних газових сумішей / В.М. Пашенко, В.Д. Кузнецов // Збірник наукових праць НУК. – 2005. – № 1 (400). – С. 40–49.
4. Голобородько Ж.Г. Опыт Херсонского судостроительного завода по применению плазменной резки / Ж.Г. Голобородько // Автоматическая сварка. – 2013. – С. 43–48.
5. Лященко Г.И. Качество реза при плазменно-дуговой резке / Г.И. Лященко // Сварщик. – 2012. – №4. – С. 34–39.
6. Васильев А.Н. Сравнительные исследования воздушно-плазменной и кислородно-плазменной резки / А.Н. Васильев, В.В. Внук, В.И. Зиновьев, Т.В. Коткина // Известия МГТУ. – 2014. – №2 (20). – С. 13–18.
7. Орлов А.С. Термодеформационные процессы при термической резке тонкостенных цилиндрических изделий: монография / А.С. Орлов. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2004. – 170 с.
8. Григорьянц А.Г. Лазерная резка металлов / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов. – М.: Высшая школа, 1988. – 128 с.
9. Носуленко В.И. Размерная обработка металлов электрической дугой / В.И. Носуленко // Электронная обработка материалов. – 2005. – №1. – С. 8–17.
10. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 763 с.
11. Пат. 92865 UA, МПК F23C 7/00. Спосіб кисневого різання металів великих товщин / В.М. Литвинов, О.І. Волошин, К.П. Шаповалов, В.А. Белінський, С.Л. Василенко, О.І. Коровченко; заявник та патентовласник ДДМА. – № u2014 02889; заявл. 21.03.14; опубл. 10.09.14, Бюл. №17. – 3 с.
12. Банов М.Д. Сварка и резка / М.Д. Банов, Ю.В. Казаков. – М.: Академия, 2001. – 313 с.
13. Литвинов М.В. Кислородная резка металлов больших толщин на заводе ЗАО «НKMЗ» / В.М. Литвинов, Ю.Н. Лысенко, С.А. Чумак и др. // Вестник Донбасской машиностроительной академии. – 2010. – №2. – С. 64–167.
14. Литвинов В.М. Газопламенная обработка металлов. Новые тенденции в создании горелочных устройств / В.М. Литвинов, Ю.Н. Лысенко, С.А. Чумак // Штрипс. – 2008. – №4. – С. 30–32.
15. Казаков С.И. Сварка плавлением и термическая резка металлов: учебное пособие / С.И. Казаков. – Курган: Издательство КГУ, 20014. – 365 с.
16. Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2 т. / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – Т. 1. – 624 с.

Рецензент: Д.Б. Глушкова, профессор, д.т.н., ХНАДУ.