

УДК 620.178.746.2

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  $\gamma$ -ФАЗЫ  
НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 40ХГМ  
ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОКОВОК**

Д.А. Мирзаев (1), Н.И. Воробьев (2), И.Л. Яковлева (3), О.К. Токовой (1),  
Д.В. Шабуров (2), Е.А. Фоминых (1), О.В. Самойлова (1)  
e-mail: fominykh@fizchim.susu.ac.ru

(1) Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

(2) ОАО «Челябинский металлургический комбинат», г. Челябинск, Россия

(3) Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Статья поступила 4 мая 2006 г.

Во многих работах, начиная с [1], было высказано предположение о том, что флокены в сталях часто, если не всегда, зарождаются на выделениях сульфида марганца [2—6]. В связи с этим в некоторых работах [6] делается вывод, что увеличение концентрации серы приводит к усилению флокенообразования. Однако в последние годы в России и за рубежом были получены убедительные данные [7—10] о том, что уменьшение концентрации серы до уровня 0,005% и ниже приводит к усилению флокенообразования. Разумная, но пока не доказанная гипотеза этого явления [4, 5] учитывает увеличение диффузионной зоны, питающей флокен в-дородом, из-за уменьшения числа центров зарождения флокенов.

В связи с этим актуальной задачей металлургии является изыскание возможностей управления выделением сульфидов. Большинство ученых считают, что сульфиды возникают на заключительной стадии кристаллизации дендритных ячеек и что их образование стимулировано ликвацией легирующих элементов стали и, прежде всего, серы, марганца и, возможно, углерода [11—13]. Но именно междендритные участки жидкости обогащаются легирующими элементами. Чем шире температурная область двухфазного состояния (жидкость + твердая фаза), тем сильнее концентрационные эффекты ликвации.

Однако наряду с неметаллическими включениями на заключительной стадии затвердевания дендритных ячеек возникают и микропоры, так как в закрытых микрообъемах кристаллизующаяся жидкость испытывает всестороннее растяжение.

По мнению [12] термическая обработка почти не влияет на распределение сульфидов (за исключением коагуляции частиц), пока нагрев не приведет хотя бы к частичному расплавлению сульфидной эвтектики.

Однако в работах [14], выполненных для сталей 18Х2Н4МА–Ш с низкой концентрацией серы 0,005% по массе, доказана реальная возможность изменения формы и распределения сульфидных выделений в процессе термической обработки. Дело в том, что для сталей с низким содержанием серы температура растворения сульфидов в  $\gamma$  – фазе относительно не высока (~ 1250°C), а степень растворения зависит и от длительности выдержки. Соответственно в условиях медленного охлаждения поковок или переохлаждения на заданную изотерму с последующей выдержкой сульфиды выделяются вновь. Отметим, что при всех температурах проявляется инкубационный период от 30 до 5 минут, предшествующий выделению. Авторы [17, 18]

обнаружили несколько температурных интервалов, различающихся морфологией и местом выделения сульфидов марганца: а) 1200...1100°C; сульфиды выделяются в форме довольно крупных частиц по границам зерна; излом интеркристаллитный; б) 1100...950°C; частицы MnS имеют игольчатую форму и выделяются в объеме зерна, излом транскристаллитный; в) 950...900°C; глобулярные частицы MnS размерами около 0,1 мкм выделяются в объеме зерна, причем в пределах дисков диаметром порядка 20 мкм они образуют на изломах сотовую структуру; вероятно, это были пленочные выделения сульфидов, подвергшиеся после нагрева под закалку делению и сфероидизации; излом транскристаллитный; г) ниже 850°C проявляется межзеренный хрупкий излом; сульфиды выделяются по границам зерна в виде пленок и мелких частиц размерами 0,1—0,3 мкм. Ниже 600°C выделение сульфидов прекращается. Наиболее сильное снижение ударной вязкости проявляется при выдержке на 750°C.

В связи с этими работами была поставлена задача проверить аналогичное влияние термической обработки для стали 40ХГМ, на которой ранее были исследованы [7, 8] закономерности флокенообразования. В данной статье рассмотрено поведение ударной вязкости после термической обработки в  $\gamma$ -состоянии сталей с различной концентрацией серы.

### Материал и методика исследования

Для исследования были отобраны три поковки одного диаметра, химический состав которых был максимально близок, но они различались концентрацией серы (0,005; 0,013 и 0,023% S) (табл.).

Химический состав использованных сталей

№ плавки	Содержание элементов, % по массе					
	C	Mn	Cr	Mo	S	P
81766	0,40	0,87	0,89	0,17	0,005	0,010
82890	0,38	0,83	0,89	0,15	0,013	0,014
81790	0,41	0,63	1,05	0,18	0,023	0,013

Из срединной зоны каждой поковки были вырезаны диски, размечено кольцо и вдоль радиуса вырезаны заготовки для ударных образцов с допуском на обезуглероживание при высокотемпературных нагревах. Схема термической обработки образцов была такой же, какую использовали авторы работ [14—16]. Температуры исходного нагрева образцов составляли 1200, 1250 и 1300°C, выдержка 30 мин. Затем образцы, выдержанные при данной температуре и разделенные на группы, были перенесены после необходимого подстуживания в печь, температуру которой последовательно изменяли: 800, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100°C. Выдержки образцов в печи для каждой температуры составляли 3, 6 и 24 мин. Затем образцы были закалены в масло, отпущены при 650°C в течение 3 часов. Очевидно, что в таком состоянии каждая группа образцов будет иметь отличный от других размер зерна. Для нивелирования зерна была проведена повторная закалка (850°C, 30 минут, охлаждение в масле) и низкий отпуск при 200°C, в течение двух часов.

После завершения термообработок из заготовок изготавливали ударные образцы с U-образным надрезом и испытывали их с помощью копра КМ-30. В дальнейшем обе части разрушенного образца, и поверхности излома были использованы для фрактографии и дифракционной электронной микроскопии.

### Результаты исследования и их обсуждение

Влияние температуры промежуточного переохлаждения аустенита на вязкость трех сталей в конечном состоянии иллюстрируют рис. 1—3.

В случае исходного нагрева на 1200°C почти не проявилось воздействие температуры переохлаждения на ударную вязкость. Все же для сталей с 0,023% серы наблюдается тенденция к повышению KCU в районе 1050°C. Но этот эффект соизмерим с погрешностью определения. При всех переохлаждениях ударная вязкость тем выше, чем ниже концентрация серы в стали. Для температур нагрева 1250°C и переохлаждения 1050°C максимум ударной вязкости стали

с 0,023% S выявился более отчетливо (рис. 2), однако он отсутствует у сталей, содержащих 0,005 и 0,013% S. Заметим, что в цитированных работах [14—16] после аналогичной обработки сталь 18Х2Н4МА–Ш имела два минимума ударной вязкости в районе 700 и 1050°С, которым соответствовало выделение сульфидов по границам зерна и интеркристаллитное разрушение. В случае стали 40ХГМ ситуация иная: перенос на 1050°С и выдержка дают не минимум, а максимум КСЧ. Данные для температуры нагрева 1300°С убедительно подтверждают этот факт (рис. 3), поскольку максимумы наблюдаются уже при всех трех концентрациях серы.

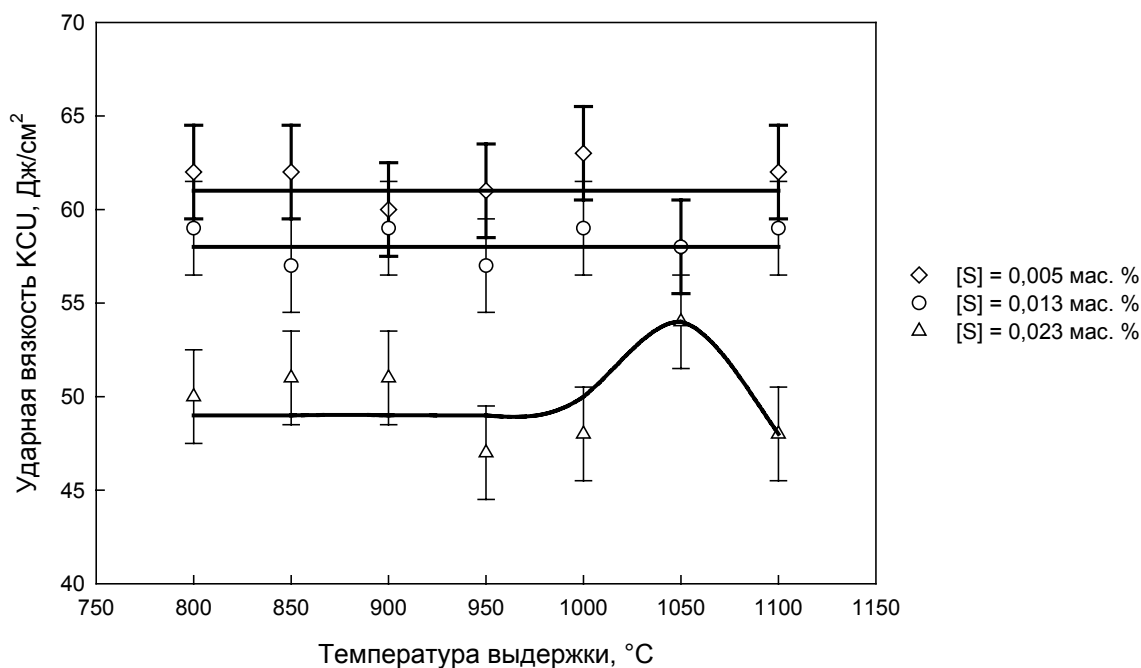


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости низкоотпущенной закаленной стали 40ХГМ с различным содержанием серы, предварительно нагретой до 1200°С от температуры промежуточной выдержки ( $\tau = 24$  мин) в аустенитном состоянии

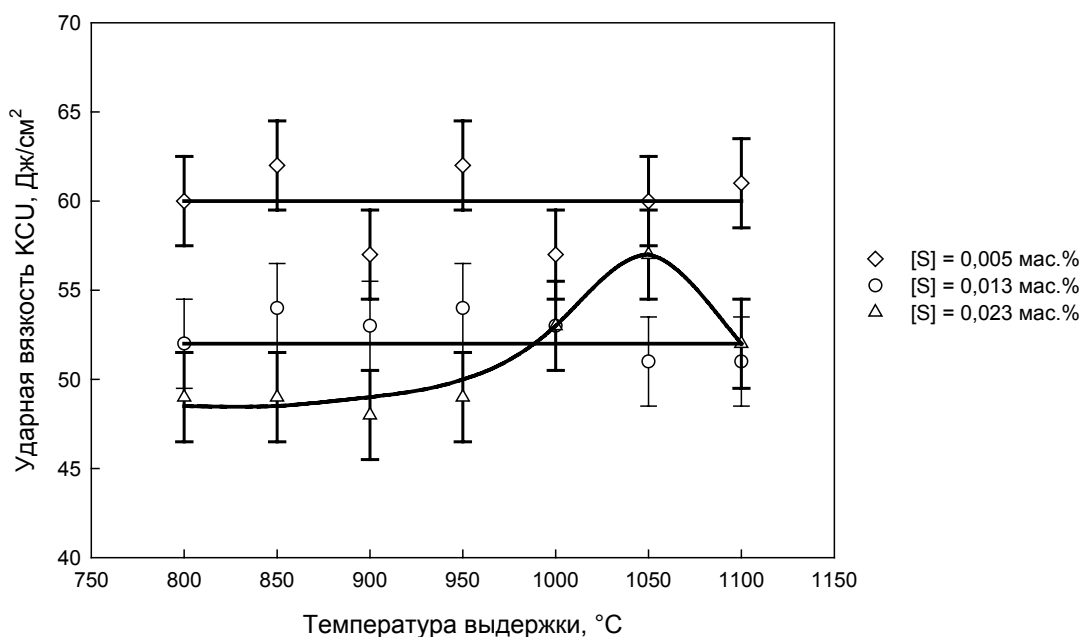


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости низкоотпущенной закаленной стали 40ХГМ с различным содержанием серы, предварительно нагретой до 1250°С от температуры промежуточной выдержки ( $\tau = 24$  мин) в аустенитном состоянии

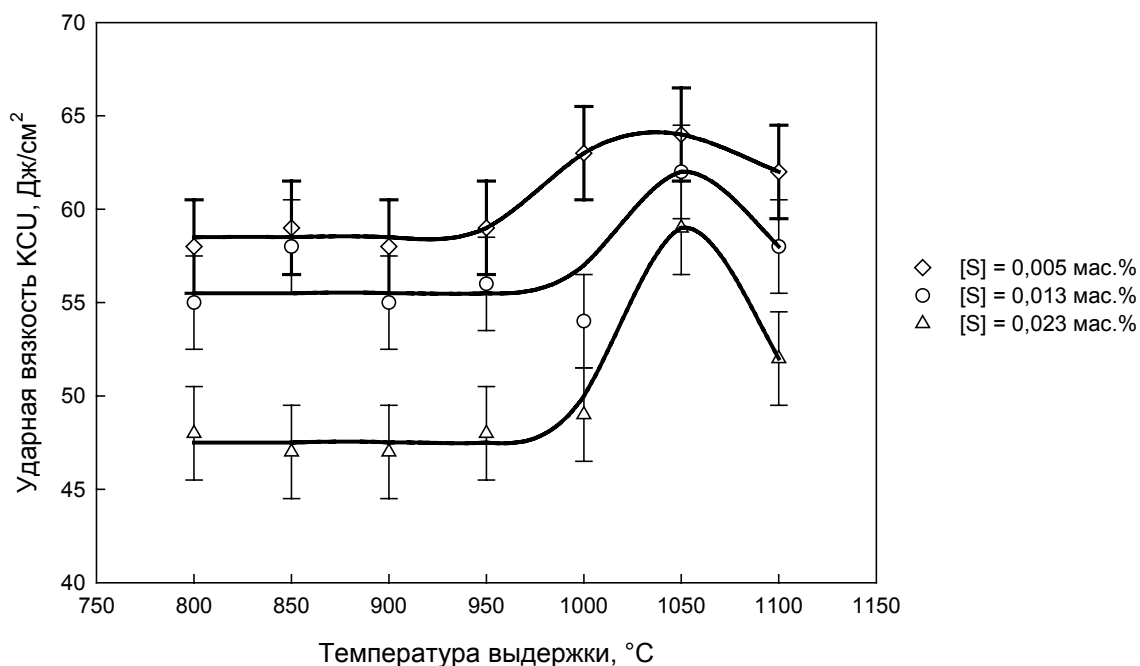


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости низкоотпущенной закаленной стали 40ХГМ с различным содержанием серы, предварительно нагретой до 1300°C от температуры промежуточной выдержки ( $\tau = 24$  мин) в аустенитном состоянии

Переохлаждение до 700°C и ниже для стали 40ХГМ использовать нельзя в силу низкой устойчивости аустенита стали. В интервале температур переохлаждения 800—1000°C ударная вязкость остается неизменной, но по-прежнему образцы с более низкой концентрацией серы имеют более высокую ударную вязкость. И только для двух температур 1050 и 1100°C мы наблюдаем соответственно сначала повышение, а затем снижение сталей ударной вязкости. На рис. 4 показана зависимость КСУ в конечном состоянии сталей от длительности промежуточной выдержки при этих двух температурах.

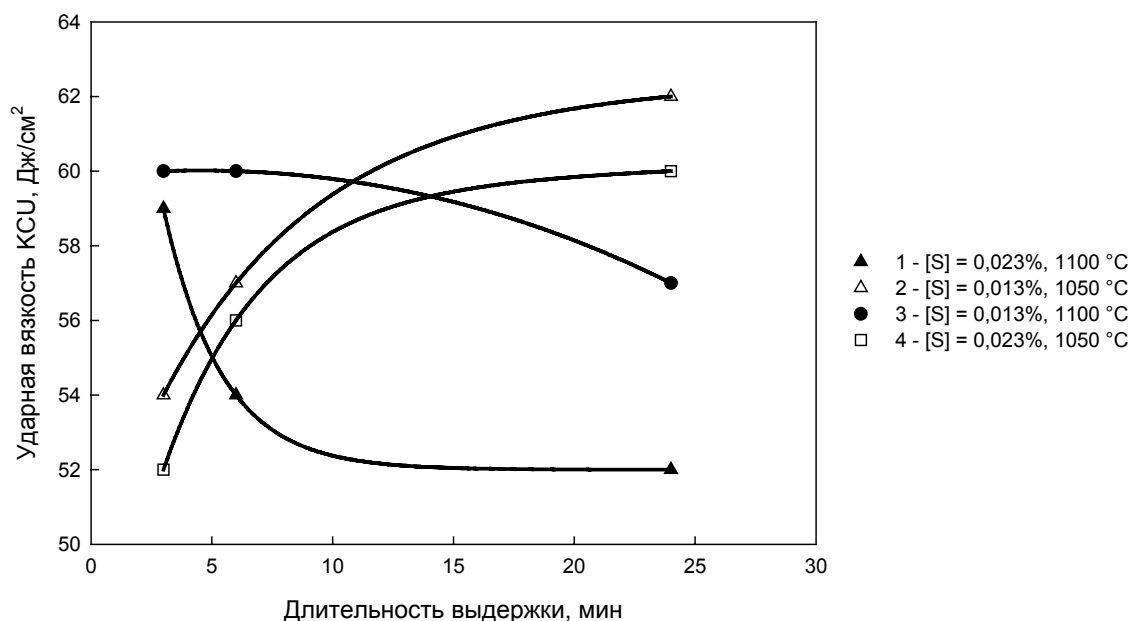


Рис. 4. Влияние длительности промежуточной выдержки при 1100°C (1,3) и 1050°C (2,4) на величину ударной вязкости стали с 0,023% S (1,4) и 0,017% S (2,3) для температуры исходного нагрева 1300°C

Для 1050°C увеличение длительности приводит к возрастанию вязкости, для 1100°C — наоборот, к понижению. Так как процессы роста  $\gamma$ -зерна или гомогенизации проходят при высокотемпературном нагреве и не могут получить развитие при значительном снижении температуры, то повышение ударной вязкости вблизи 1050°C, вероятнее всего, является сульфидным эффектом, то есть связано с растворением и затем выделением из  $\gamma$ -раствора сульфида марганца. Эта проблема будет рассмотрена в следующих публикациях авторов.

## Заключение

1. Высокотемпературный нагрев образцов стали 40ХГМ, содержащих различное количество серы, до 1200...1300°C с последующим переносом на изотермы 800...1100°C с выдержкой влияет на величину ударной вязкости только в интервале изотерм 950—1100°C. Причем для температуры промежуточной выдержки 1000°C наблюдается максимум КСУ. При выдержке на 950 либо 1100°C ударная вязкость снижается.

2. Высота максимума возрастает при увеличении концентрации серы в стали.

3. Средний уровень ударной вязкости для любой изотермы возрастает при уменьшении содержания серы.

## Список литературы

1. Чучмарев С.К., Сторчак В.Г., Барг Л.Г., Езиков В.И., Кислицкий А.Б. Влияние неметаллических включений на окклюзию водорода сталью в напряженном состоянии // Известия АН СССР. Металлы, 1972. № 1. С. 42—44.
2. Гельд П.В., Рябов Р.А. Водород в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1974. 272 с.
3. Гельд П. В., Рябов Р. А., Кодес Е.С. Водород и несовершенства структуры металла. М.: Металлургия, 1979. 221 с.
4. Штремель М.А., Князев А.А., Либенсон А.Г. Кинетика роста флокенов // ФММ, 1982. Т. 54, № 4. С. 804—805.
5. Штремель М.А., Князев А.А. Кинетика раскрытия внутренней зернограницной трещины водородом // ФММ, 1986. Т. 62, № 4. С. 645—651.
6. Вороненко Б.И. Водород и флокены в стали // МиТОМ, 1997. № 11. С. 12—18.
7. Воробьев Н.И., Токовой О.К., Мокринский А.В. и др. Влияние содержания серы и неметаллических включений в стали на флокенообразование в крупных поковках // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2003. № 2. С. 18—20.
8. Воробьев Н.И., Токовой О.К., Мокринский А.В. и др. Влияние содержания водорода в металле на качество крупных поковок // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2003. № 3. С. 17—19.
9. Дерябин А.А., Горшенин И.Г., Матвеев В. В. и др. Влияние элементного состава стали на флокеночувствительность рельсов в условиях производства НТМК. // Тр. седьмого конгресса сталеплавателей. М.: Изд. Черметинформация, 2003. С. 172—176.
10. Дерябин А.А., Горшенин И.Г., Матвеев В.В. и др. Флокеночувствительность железнодорожных рельсов производства НТМК // Сталь, 2003. № 11. С. 88—91.
11. Лунев В.В., Аверин В.В. Сера и фосфор в стали. М.: Металлургия, 1988. 257 с.
12. Малиночка Я.Н., Ковальчук Г.З. Сульфиды в сталях и чугунах. М.: Металлургия, 1988. 248 с.
13. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Окенко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. М.: Металлургия, 1980. 174 с.
14. Садовский В.Д., Кутьин А.Б., Гербих Н.М. Транскристаллитное охрупчивание закаленной стали при задержке охлаждения в аустенитной области // ДАН СССР, 1989. Т. 305, № 3. С. 611—613.
15. Кутьин А.Б., Садовский В.Д., Гербих Н.М., Маевская О.Э. Образование пленочных сульфидных выделений в объеме аустенитного зерна // ФММ, 1990. № 10. С. 175—184.
16. Садовский В.Д., Кутьин А.Б., Гербих Н.М., Полякова А.М. Изменение морфологии сульфидов при термообработке стали с низким содержанием серы // ФММ, 1987. Т. 64, Вып. 2. С. 368—377.
17. Садовский В.Д., Кутьин А.Б., Гербих Н.М. Влияние сульфидной фазы на свойства стали после термической обработки // МиТОМ, 1987. № 11. С. 15—22.
18. Счастливец В.М., Кутьин А.Б., Смирнов М.А. Исправление структуры и изломов перегретой конструкционной стали. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 190 с.