ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ, ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И СОСТАВА ШТАМПОВОЙ СТАЛИ НА ХЛАДНОСТОЙКОСТЬ

А.Т. Евтушенко

Рассматривалось влияние остаточного аустенита на вязкость штамповых сталей. Установлено, что для надежной характеристики вязкости инструментальных сталей надо внести еще один критерий, а именно устойчивость аустенита при низких температурах.

The influence of residual austenite on tenacity of steel of has been studied. It was determined that for effective characteristic of steel's tenacity stability of austenite at low temperature should be taken into account.

При определении вязкости инструментальных сталей важно одно существенное отличие в их структурном состоянии, которое для конструкционных сталей является незначительным. Это отличие определяется ролью остаточного аустенита. В сталях с 0,6-0,7%С всегда сохраняется большое количество остаточного аустенита: 2-3% при 1%Cr и 5-7% при 3%Cr. У сталей, легированных марганцем (7ХГ2ВМ), даже при закалке на мелкое зерно, сохраняется 15-20% остаточного аустенита.

Следовательно, для надежной характеристики вязкости инструментальных сталей надо ввести еще один критерий, а именно определение степени устойчивости аустенита при низких температурах.

Таким образом, вязкость исследуемых сталей характеризовалась в настоящей работе по двум критериям:

1) значениям ударной вязкости при +20 и при -60°С;

2) устойчивости аустенита при низких температурах.

Наконец, при изучении вязкости инструментальных сталей с 0,5-0,7 % необходимо было учитывать еще один фактор. Известно, что работа разрушения надрезанного ударного образца ($a_н$) состоит из двух слагаемых: 1) работы, затрачиваемой на пластическое и упругое деформирование образца до возникновения на дне надреза трещины (работа зарождения трещины $a_з$) и, 2) работы затрачиваемой на распространение этой трещины по сечению образца (работа развития трещины $a_р$). Однако установлено [1-3], что $a_р$ – характеризует работу затрачиваемую на окончательное разрушение при вязком изломе. При хрупком разрушении высокопрочных сталей какими являются инструментальные стали работа развития трещины ($a_р$) очень мала и, определяемая для таких сталей, вязкость характеризуется, по существу, только работой зарождения трещины ($a_з$).

Для исследования были выбраны стали с 0,6%С и с систематически изменявшимся содержанием легирующих элементов (табл. 1).

Таблица 1 – Химический состав штамповых сталей, исследованных для определения хладноломкости

Сталь	Химический состав, %					
	C	Mn	Si	Cr	W	V
Стандартные стали						
6ХС	0,6	0,29	0,76	1,16	-	-
6ХВ2С	0,56	0,4	0,64	1,27	2,52	-
7Х3	0,6	0,18	0,24	3,52	-	-
Опытная сталь						
6Х3ФС	0,56	0,33	0,67	3,5	-	1,1

Склонность штамповых сталей к хрупкому разрушению оценивалась для структурного состояния и условий, в наибольшей степени, приближающиеся к эксплуатационным, а именно для структур: отпущенных мартенсит (отпуск 150°С), троостомартенсит (отпуск 250-30°) и бейнит (изотермическая закалка с выдержкой 250-260°). Нагрев для закалки выполнялся до температур, при которых стали сохраняли мелкое зерно (балла 10-12).

Определения вязкости выполнялись при +20 и при -60°С.

Испытания показали, что стали разрушались хрупко во всем интервале исследованных температур. Однако доля работы, расходуемая на развитие трещины, намного возрастала для некоторых условий термической обработки сталей, рассматриваемых ниже.

Хладноломкость сталей после непрерывной закалки и отпуска. Для структурных

состояний мартенсит и троостомартенсит стали, в зависимости от их химсостава, отличались в твердости уже после отпуска 150°. Более высокая твердость (58 HRC) после такого отпуска имела сталь 6Х3ФС; сталь 6ХС немного уступала в твердости (56 HRC). Твердость стали 6ХВ2С была еще ниже: 54 HRC.

Вязкость сталей 6ХС и 6ХВ2С после отпуска 150° не превышала 1,4 и 1,6 Дж/см^2, у сталей 7Х3 и 6Х3ФС она была выше: 2,4-2,5 Дж/см^2.

Таблица 2 – Вязкость и твердость штамповой стали с 0,6%С в зависимости от структурного состояния и температуры испытания. Закалка температур, сохраняющих мелкое зерно

	Отпуск 150°С					Отпуск 250°С				
	HRC	+20°		-60°		HRC	+20°		-60°	
		a%	KCU Дж/см^2	a%	KCU Дж/см^2		a	KCU Дж/см^2	a%	KCU Дж/см^2
Стандартные стали										
6ХС	57	3,0	1,4	3,0	1,0	54	0	2,4	0	2,2
6ХВ2С	54	4,0	1,6	4,0	1,6	53	1-2	2,6	1-2	2,2
7Х3	53	4,0	2,4	4,0	1,8	52	2,0	2,4	2,0	2,0
Опытная сталь										
6Х3ФС	58	8-0	2,5	8,0	2,0	55,5	7,0	3,5	7,0	3,0

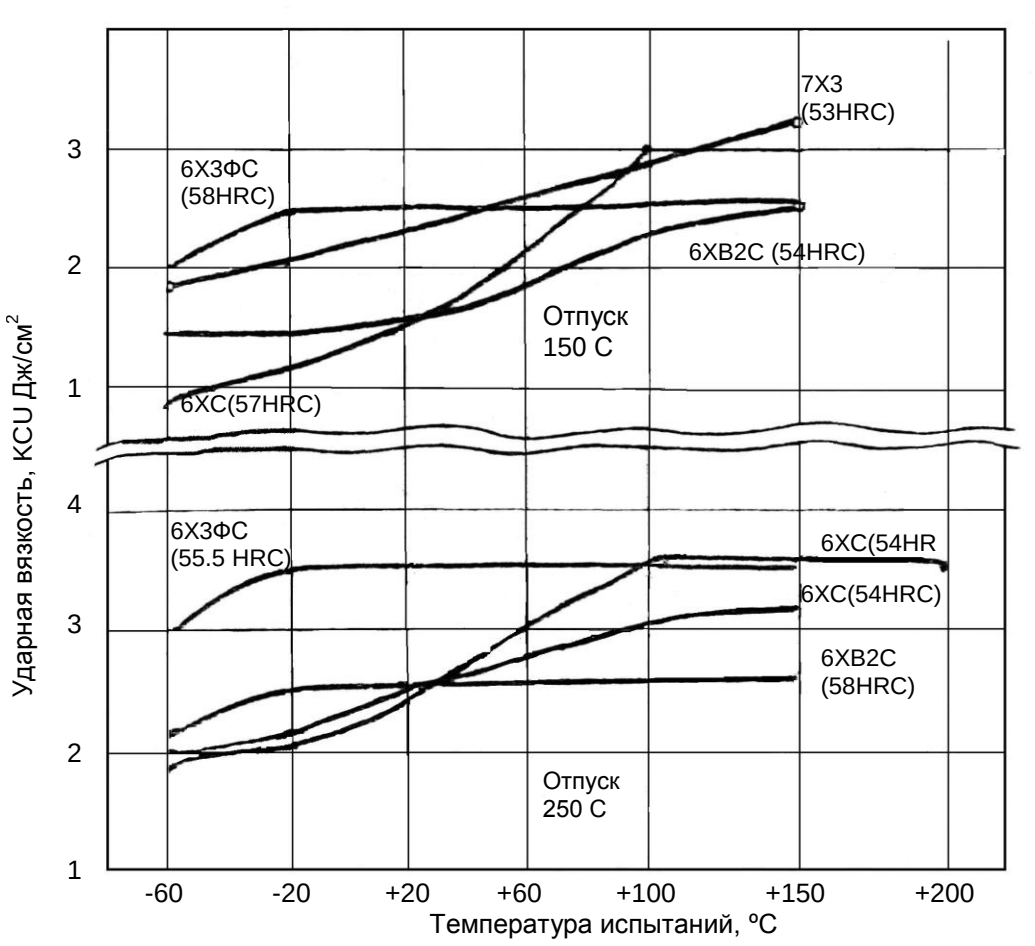

Рисунок 1 – Вязкость штамповых сталей с 0,6%С в зависимости от температуры испытания. Непрерывная закалка

Получение более высокой вязкости у стали 6Х3ФС несмотря на ее более высокую твердость, связано с сохранением мелкого зерна (11 балл) и большего количества ау-

стенита (7-10%). Зерно сталей 6ХС и 6ХВ2С отвечало баллу 10-11, а количество аустенита было меньше: в пределах 3-4%.

Вязкость при низких температурах: до -40°С, как показали испытания (табл.2 и рис. 1), находится в прямой зависимости от ее значения при +20°; чем выше вязкость при обычных температурах, тем соответственно более высокой (или даже неизменной) она сохраняется и при низких температурах.

Однако для более низкой температуры -60°С наблюдается отклонение от этой прямолинейной зависимости. Вязкость стали 6ХС снижается значительнее, чем у сталей 6Х3ФС и 7Х3 (рис. 1); она изменяется от 1,4 Дж/см^2 (при +20°) до 1,0 Дж/см^2 (при -60°). Для стали 6ХС и от 2,5 до 2,0 Дж/см^2 для стали 6Х3ФС.

Таблица 3 – Количество остаточного аустенита в сталях без отпуска с 0,6%С в зависимости от термической обработки и охлаждения до -60°С

Сталь	Закалка (масло)			Изотермическая закалка (250°)					
	Температура, °С	Количество аустенита, %		Температура, °С	Количество аустенита, %		Температура, °С	Количество аустенита, %	
		+20°	-60°		+20°	-60°		+20°	-60°
Стандартные стали									
6ХС	860	3-4	1,5	860	5	5	920	6	3
6ХВ2С	920	4,5	4,0	920	4,5	4,5	1000	6-7	5
7Х3	880	4-5	2-3	880	5,0	5,0	920	21-23	13-14
Опытная сталь									
6Х3ФС	1020	9-10	5	960	23-25	23-25	1020	27-28	19-20

Вязкость стали 6ХВ2С оставалась неизменной как при +20°, так и при -60° и составляла 1,6 Дж/см^2.

Наши испытания установили, что такое изменение вязкости находится в прямой зависимости от устойчивости остаточного аустенита.

Устойчивость аустенита проверялась магнитным методом. Результаты, приведенные в табл. , показывают, что отпуск 150° почти не снижает количество аустенита, однако увеличивает его устойчивость при низких температурах. В этом случае количество аустенита при 60° остается неизменным у всех исследуемых сталей.

Другая картина наблюдается при обработке холодом сталей без предварительного отпуска. В этом случае наиболее устойчив аустенит у стали 6ХВ2С (табл.3) его количество снижалось от 4,5% (при +20°) до 4% (при -60°). Наименьшая устойчивость аустенита у стали 6ХС; после охлаждения до -60° его сохраняется в структуре не боле 1,5%. Аустенит стали 6Х3ФС достаточно устойчив; после охлаждения до -60° его сохраняется до 5%.

Аналогично (как у стали 6Х3ФС) изменяются количество аустенита и вязкость стали 7Х3.

Результаты испытаний хорошо согласуются, таким образом, с положением о том, что устойчивость аустенита при охлаждении до низких температур определяется его составом [4, 5,]. Действительно, аустенит более устойчив у стали 6ХВ2С, легированной вольфрамом и кремнием, и у стали 6Х3ФС, легированной хромом в повышенном количестве и кремнием.

Для дополнительной проверки сделанного здесь вывода о влиянии остаточного аустенита на вязкость стали при низких температурах был выполнен следующий эксперимент. Образцы стали 6Х3ФС, имевшие 9-10% аустенита при твердости 58 HRC, охлаждали до -196°С. После такого охлаждения количество аустенита не превышало 2%; при этом твердость возросла до 59-60 HRC. Испытания при +20° показали, что вязкость этих образцов понизилась вдвое: с 2,5 до 1,2 Дж/см^2. Это дополнительно подтверждает положительное влияние аустенита на вязкость (табл.4).

Для отпуска 250° различие в твердости менее значительно; она составила 52-54 HRC для сталей 7Х3, 6ХВ2С, 6ХС и 55,5 HRC для стали 6Х3ФС. Отпуск при 250° вызывает почти полное превращение аустенита в стандартных сталях 6ХС, 6ХВ2С, 7Х3; его количество снижается до 1-2%. В то же время в стали 6Х3ФС, содержащей 3% Cr, аустенита сохраняется больше: до 7%.

Таблица 4 – Влияние остаточного аустенита на вязкость стали 6Х3ФС. Закалка с температур, сохраняющих мелкое зерно

Отработка	Без обработки холодом			Обработка холодом -196°С		
	HRC	Количество аустенита, %	KCU, Дж/см^2	HRC	Количество аустенита, %	KCU, Дж/см^2
Закалка и отпуск 150°С	58	8	2,5	59-60	2	1,25
Изотермическая закалка 250°С	52	28	6,0	54,0	13-15	3,5

Хладноломкость сталей после изотермической закалки. После изотермической закалки с выдержкой при 250° (45 минут) твердость была ниже: 50-53 HRC у всех исследуемых сталей (табл.5).

Вязкость сталей возросла по сравнению с получаемой после непрерывной закалки и отпуска при 250 на одинаковую твердость. Она увеличилась с 2,4 до 3,5 Дж/см^2 у стали 6ХС и немного больше у стали 6ХВ2С и 7Х3: от 2,6 и 2,4 Дж/см^2 до 4,8 и 4,9 Дж/см^2 соответственно. Наиболее высокую вязкость после изотермической закалки приобрела сталь 6Х3ФС; вязкость возросла от 3,5 до 6,0 Дж/см^2.

Эти данные относятся к испытаниям при +20°; повышение вязкости связано с тем, что стали получают бейнитную структуру и повышенное содержание аустенита (табл. 5). Оно наибольшее у стали 6Х3ФС.

Существенно характеризовать вязкость при -60°, т.е. при температуре, для которой, как было показано выше, наблюдается заметное снижение вязкости у многих сталей, подвергнутых непрерывной закалке с отпуском как при 150°, так и при 250°.

Испытания показали, что наибольшее снижение вязкости наблюдается у стали 6ХС. Высокая вязкость полученная после изотермической закалки 3,5 Дж/см^2 (при +20°), уменьшается очень значительно: до 1,0 Дж/см^2 при снижении температуры испытания до -60°С. У сталей 6ХВ2С и 7Х3 снижение вязкости менее значительно; она изменяется от 4,8 и 4,9 Дж/см^2 до 3,4 и 3,5 Дж/см^2 соответственно.

Следовательно, в этом случае, как и после непрерывной закалки и отпуска 250°, стали, легированные вольфрамом и хромом, меньше снижают вязкость при отрицательных температурах.

Снижение температуры испытания до -60° также немного изменяет вязкость стали 6Х3ФС; она снижается с 6,0 до 5,2 Дж/см^2 (см. табл.5, рис. 2).

Таблица 5 – Вязкость, твердость и количество остаточного аустенита сталей с 0,6%С в зависимости от температуры испытания. Изотермическая закалка с температур, сохраняющих мелкое зерно

Сталь	Изотерма 250°С					Изотерма 300°С				
	HRC	+20°		-60°		HRC	+20°		-60°	
		A%	KCU Дж/см^2	A%	KCU Дж/см^2		A%	KCU Дж/см^2	A%	KCU Дж/см^2
Стандартные стали										
6ХС	53	5,0	3,5	5,0	1,0	48	0	3,7	0	2,2
6ХВ2С	52,5	6,0	4,8	6,0	3,4	47	1-2	4,5	1-2	3,4
7Х3	50,0	5,0	4,9	5,0	3,5	48	4,0	5,2	4,0	3,5
Опытная сталь										
6Х3ФС	52,0	28	6,0	20	5,2	50,0	20	5,8	20	3,5

Из результатов испытаний следует, что в случае изотермической закалки (как и для непрерывной закалки) вязкость сталей зависит от устойчивости остаточного аустенита. Количество его в результате изотермической закалки возросло с 4 до 5% у сталей 6ХС и 7Х3, немного больше у стали 6ХВ2С – 6% и значительно у стали 6Х3ФС – 28%.

Вместе с тем наибольшую устойчивость против холода обнаруживает аустенит стали 6Х3ФС; после охлаждения до - 60° его количество остается неизменным (23-25%) в случае закалки, сохраняющей зерно балла (940-960°С).

Количество аустенита стандартных сталей при снижении температуры до -60° также не изменяется в случае закалки на мелкое зерно. При закалке с повышением температур, увеличивающих количество остаточного аустенита до 6-7% у стали 6ХС и 6ХВ2С. И до

21-23% у стали 7Х3, его устойчивость против холода заметно снижается.

В результате охлаждения до -60° количество аустенита уменьшается до 13-14% у стали 7Х3 и до 3-5% у сталей 6ХС и 6ХВ2С (табл.3).

Таким образом и для случая изотермической закалки большая устойчивость аустенита обеспечивается в результате совместного легирования хромом, кремнием и вольфрамом или увеличение содержания хрома до 3%.

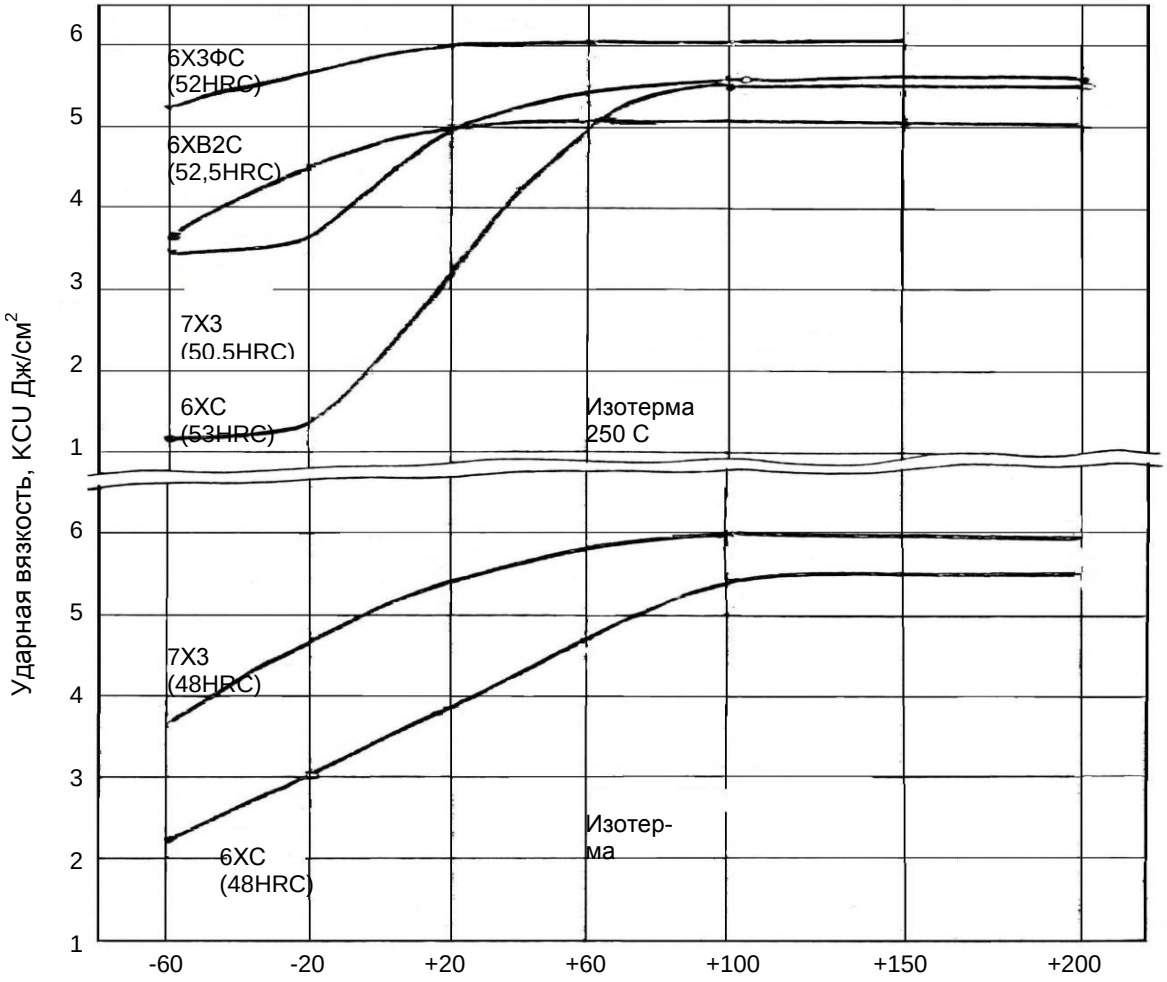

Рисунок 2 – Вязкость штамповых сталей с 0,6%С в зависимости от температуры испытания

Для дополнительной характеристики влияния аустенита на вязкость стали с бейнитной структурой были проведены следующие испытания.

Образцы стали 6Х3ФС, имевшей после изотермической закалки 28% аустенита и твердость 52 HRC, подвергали охлаждению до -196° (2 часа); количество аустенита снизилось до 13-15%, твердость при этом возросла до 54HRC . Ударная вязкость, определенная при +20°, снизилась до 3,5 Дж/см^2 (против 6 Дж/см^2 до обработки холодом) (см. табл. 4).

Влияние аустенита на вязкость при бейнитной структуре было проведено также для сталей 7Х3 и 6ХС. После закалки с выдержкой при изотерме 300° эти стали имели бейнитную структуру, однако без аустенита у стали 6ХС и до 4% у стали 7Х3. Твердость их снизилась при этом до 48 HRC (против 50-53 HRC для закалки с изотермой 250°), что конечно, уменьшило сопротивление пластической деформации. Однако вязкость в результате такой закалки почти не изменилась и оставалась равной: 3,7 Дж/см^2 у стали 6ХС и 5,2 Дж/см^2 у стали 7Х3 (табл.5).

На рис. 2 и табл. 5 видно, что при температуре испытания -60° ударная вязкость сталей с бейнитной структурой также снизилась: с 3,7 до 2,2 Дж/см^2 для стали 6ХС и с 5,8 до 3,5 Дж/см^2 для стали 6Х3ФС.

Следовательно хладностойкость сталей с 0,6%С, условно характеризуется в данном случае интенсивностью снижения вязкости от +20°С до -60°С, в значительной степени зависит (в отличие от поведения конструкционных сталей) от присутствия в структуре остаточного аустенита и его устойчивости при низких температурах.

Таким образом, как в испытаниях ударной вязкости при +20°С и при низких температурах, было установлено благоприятное влияние аустенита. В связи с этим нами были изучены причины подобного влияния аустенита.

Прежде всего для этой цели нами была взята для испытания сталь Х12М, характерная тем, что в ней можно получить очень высокое количество остаточного аустенита. Кроме того, аустенит этой стали устойчив как против холода (при -60° не происходит его превращения), так и против отпуска. Ударные образцы стали Х12М закаливают от 1180° на 50% остаточного аустенита и испытывали на копре.

Рентгеноструктурный анализ поверхности излома показал, что за время микропластической деформации (распространение трещины) происходит превращение примерно 50-55% аустенита в мартенсит (рис. 3).

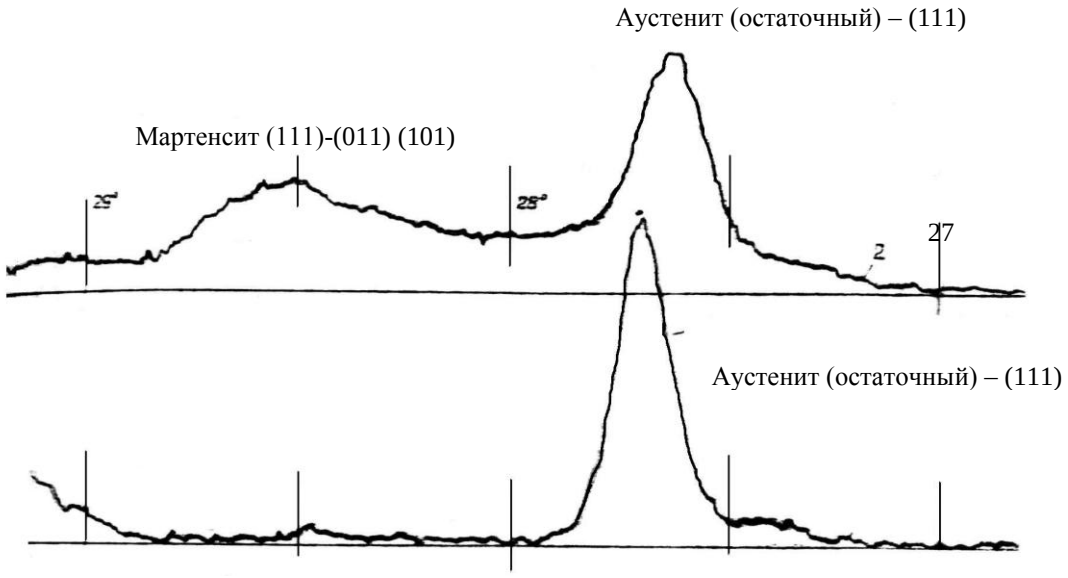

Рисунок 3 – Рентгенограмма стали Х12М /закалка с 1180° и отпуск 150°С/: 1 – до разрушения; 2 – поверхность разрушения

Таблица 6 – Составляющие ударной вязкости ($a_H = a_З + a_Р$) стали: Х3ФС в зависимости от термической обработки и температуры испытания. (Нагрев при закалке с 1020°С)

Термическая обработка, °С	Количество аустенита, %		KCU Дж/см^2		$a_З$, Дж/см^2		$a_Р$, Дж/см^2	
	+20°	-60°	+20°	-60°	+20°	-60°	+20°	-60°
Отпуск 150°	8	8	2,5	2,0	1,9	1,85	0,5	0,15
Отпуск 250°	7	7	3,5	3,0	3,1	3,0	0,4	0
Изотермичская закалка изотерма 250	28	20	6,0	5,2	5,1	4,6	0,9	0,6

Эти определения поведения аустенита при микропластической деформации показали, что его устойчивость и в случае деформации, практически не зависят от состава стали. Превращения происходят как у стали Х12М с высокой устойчивостью аустенита, так и у сталей с меньшей его устойчивостью (стали 7ХГ2ВМ, 6Х3ФС). В то же время интенсивность превращения при обработке холодом сильно зависит от состава стали.

Кроме того, превращение аустенита «под напряжением» происходит с повышением твердости. Этот эффект был отчетливо виден на стали Х12М, в которой, при уменьшении количества аустенита «под напряжением», резко увеличивается твердость: до 743HV; ее возрастание распространялось на глубину до 1 -1,5 мм.

Таким образом, первый вывод, который нужно сделать, заключается в следующем: превращение аустенита «под напряжением», вызывающее повышение твердости, протекает в тонком слое и не снижает вязкости, так как этот слой располагается на вязкой основе.

Выше было показано, что вязкость стали Х12М при 95% остаточного аустенита составляет 5 Дж/см^2, уменьшение его содержания до 44% снижает вязкость до 3,2 Дж/см^2, и при 30% аустенита она составляет 2,4 Дж/см^2. Несомненным, следовательно, является вывод о том, что уменьшение количества аустенита снижает ударную вязкость.

Дальнейшие попытки, выполнения нами, позволили указать и на другую причину полезного влияния остаточного аустенита.

Выше указывалось, что важная структурная составляющая ударной вязкости – работа развития трещины (a_p) у инструментальных сталей 0,5-0,6%С, при указанной твердости (полученной непрерывной закалкой с отпуском), очень низка.

Нами был поставлен эксперимент, заключавшийся в определении работы, затрачиваемой на распространение трещины, для стали 6Х3ФС в разном структурном состоянии и при разном количестве аустенита. Вязкость определялась при двух температурах испытания: +20° и -60°. Результаты испытаний приведены в табл. 6.

Эти данные получены при использовании методики А.П.Гуляева. В наших испытаниях подтвердились указания работ [6, 7], о том что эта методика определения работы развития трещины является не достаточно точной и надежной.

Это выразилось в том, что было получено значительное рассеивание результатов на разных образцах одной и той же стали, обработанными по одному режиму. Действительно, для стали 6Х3ФС работа распространения трещины изменялась от 0,4 до 0,75 Дж/см^2 при 8% остаточного аустенита. Однако в случае сохранения повышенного количества остаточного аустенита работа распространения трещины была больше (особенно при -60°С), чем в стали с обычным количеством аустенита.

Из полученных нами данных следует, что аустенит, находящийся в устье трещины, как более вязкая составляющая, затрудняет распространение возникающей трещины. В связи с этим возрастает работа распространения трещины (a_P). Для исследуемых штамповых сталей эта работа остается сравнительно низкой. Достаточно указать, что у строительных сталей 15ГС и 24 Г работа распространения трещины при +20° по данным А.П.Гулеза [8] составляет 2 Дж/см^2, однако при -60° меньше нуля.

Все эти данные указывают на важность повышения устойчивости остаточного аустенита против его превращения при низких температурах. Наибольшее количество аустенита обеспечивается в результате изотермической закалки. Поскольку для этих условий обработки достигается большая вязкость чем при обычной закалке, что последующий отпуск является излишним. Для изученных нами условий эксплуатации неизбежно возникает вопрос, - возможно ли после дополнительного отпуска после изотермической закалки при неизменном фазовом составе повысить устойчивость аустенита против превращения при дальнейшем охлаждении до низких температур.

Режим отпуска должен быть таким, чтобы не изменялась структура полученная в результате изотермической обработки, и обеспечивалась стабилизация аустенита. Таким отпуском может быть нагрев 150-160°. Для проверки этого положения были взяты образцы стали 6Х3ФС. Они были подвергнуты изотермической закалке и имели в структуре 28% аустенита.

Часть образцов была подвергнута отпуску 150-160° один час, другие образцы оставались без дополнительного отпуска. Затем определялись ударная вязкость как при -60°, так и при +20°С. Результаты испытаний приведены в табл. 30.

Таблица 7 – Влияние отпуска 150° после изотермической закалки с оптимальных температур на стабилизацию остаточного аустенита и на вязкость стали 6Х3ФС 0,7 (Изотерма 250°С)

Изотермическая закалка	Количество аустенита, %		KCU Дж/см^2	
	+20°	-60°	+20°	-60°
Без отпуска	28	20	6,0	5,2
Отпуск 150-160°	25	25	5,5	5,5

Испытания подтвердили, что аустенит, полученный изотермической закалкой и не подвергнутый стабилизирующему отпуску, имеет меньше устойчивость против влияния низких температур. Его количество, превышающее 28% при +20°, после охлаждения до -60° сократилось до 20%. В соответствии с этим ударная вязкость снизилась с 6 до 5,2 Дж/см^2. В результате применения дополнительного отпуска после изотермической закалки была обеспечена практически полная устойчивость аустенита при -60°. Одновременно вязкость стали не изменялась в случае охлаждения до низких температур.

В результате исследования можно сделать следующие выводы.

1) Остаточный аустенит значительно влияет на вязкость штамповых сталей.

2) Количество остаточного аустенита и его устойчивость зависят от легирования стали.

3) Превращение остаточного аустенита под напряжением вызывает повышение твердости и не снижает вязкость стали.

4) Остаточный аустенит, как вязкая составляющая затрудняет распространение возникающей трещины.

5) Наибольшее количество остаточного аустенита получается в результате изотермической закалки.

6) После изотермической закалки необходим отпуск при 150-160ºС не изменяющий структуру, но стабилизирующий устойчивость остаточного аустенита, что не снижает вязкость при охлаждении до низких температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, А. П. Заводская лаборатория / А.П. Гуляев, 1970. – С. 12 .

2. Гуляев, А. П. Заводская лаборатория / А.П. Гуляев, В.Н. Никитин, 1964. – С. 7.

3. Гуляев, А. П. Металловеденье и термическая обработка металлов / А.П. Гуляев, 1967. – С. 10

4. Воробьёв, В. Г. Термическая обработка стали при температуре ниже нуля / В.Г. Воробьев, Оборонгиз, 1954.

5. Гуляев, А. П. Термическая обработка стали / А.П. Гуляев, Машгиз, 1963.

6. Дроздовский, Б. А. Заводская лаборатория / Б.А. Дроздовский, 1971. – С. 2.

7. Владимировский, Г. А. Заводская лаборатория / Г.А. Владимировский, 1969. – С. 5.

8. Гуляев, А. П. Металловеденье и термическая обработка металлов / А.П. Гуляев, Н.П. Неверова-Скобелева, 1957. – С. 4.