

## МАЛОЛЕГИРОВАННЫЕ ЛИТЫЕ БЫСТРОРЕЖУЩИЕ СТАЛИ

Н. А. ЕРОФЕЕВ

(Представлено профессором доктором А. Н. Добровидовым)

Для изготовления литого режущего инструмента используются главным образом стали Р18 и Р9 или близкие к ним [1, 2]. Изготовление литого инструмента из более дешевых марок сталей мало исследовано и рассматривается только в работе [3]. В настоящей работе приводятся результаты исследования по изысканию новых составов малолегированных быстрорежущих сталей для литого режущего инструмента.

### Выбор состава сталей и их плавка

Устранение ковки при изготовлении литого инструмента позволяет в широких пределах изменять содержание отдельных элементов в стали. Для исследования нами было отлито 32 плавки с различным содержанием углерода, ванадия, вольфрама и хрома (табл. 1).

Первая группа включает безвольфрамовые хромованадиевые стали, отличающиеся друг от друга содержанием углерода или ванадия. Выделение этой группы преследовало цель изыскания стали для изготовления литого инструмента без вольфрама.

Содержание углерода в кованных быстрорежущих сталях определяется возможностью их ковки и составляет  $0,7 \div 0,9$  %. По данным А. П. Гуляева [4] повышение содержания углерода от 0,7 до 1,3 % в малолегированной кованой быстрорежущей стали непрерывно повышает режущую способность стали. И. С. Кватер [2] считает оптимальным содержание углерода в литой стали 0,9—1,1 %. По результатам исследования Н. Д. Тютевой и И. Т. Тихонова [5] для стали типа Р9 оптимальным является содержание углерода равное 1,0—1,1 %.

Влияние ванадия на свойства кованных и литых быстрорежущих сталей рассматривается в работах [6, 7, 8]. Из результатов исследования А. П. Гуляева [7] следует, что при повышении содержания ванадия до 2,5 % в малолегированной кованой быстрорежущей стали производительность инструмента резко возрастает, при дальнейшем повышении содержания ванадия производительность инструмента начинает падать. По данным Рахштадта и Геллера [9] ванадий улучшает красностойкость стали в том случае, если повышение его содержания сопровождается увеличением содержания углерода.

И. С. Кватер [2] установил, что повышение содержания ванадия

Таблица 1

| №<br>п/п                                 | Обозначение<br>стали | Химический состав |      |       |      |      |      | Твер-<br>дость<br>после за-<br>калки<br>(литья)<br>по Rc |
|------------------------------------------|----------------------|-------------------|------|-------|------|------|------|----------------------------------------------------------|
|                                          |                      | C                 | W    | Cr    | V    | Si   | Mn   |                                                          |
| Первая группа сталей                     |                      |                   |      |       |      |      |      |                                                          |
| 1                                        | 1,0-0-4-0            | 1,04              | —    | 3,94  |      | 0,46 | 0,19 | 49                                                       |
| 2                                        | 0,8-0-4-1,5          | 0,73              | —    | 4,39  | 1,73 | —    | 0,19 | 61                                                       |
| 3                                        | 1,0-0-4-1,5          | 1,09              | —    | 4,19  | 1,63 | —    | —    | 54                                                       |
| 4                                        | 1,4-0-4-1,5          | 1,08              | —    | 4,61  | 1,72 | —    | —    | 51                                                       |
| 5                                        | 0,8-0-4-3            | 0,87              | —    | 4,01  | 2,90 | -    | 0,11 | 63                                                       |
| 6                                        | 1,2-0-4-3            | 1,17              | —    | 4,80  | 3,00 | 0,54 | 0,21 | 60                                                       |
| 7                                        | 1,3-0-4-3            | 1,32              | —    | 4,31  | 3,00 | —    | 0,21 | 56                                                       |
| 8                                        | 0,8-0-4-4            | 0,81              | —    | 3,86  | 3,89 | —    | —    | 59                                                       |
| 9                                        | 1,3-0-4-4            | 1,32              | —    | 3,84  | 4,19 | —    | —    | 62                                                       |
| 10                                       | 1,4-0-4-4            | 1,44              | —    | 4,11  | 4,31 | —    | —    | 60                                                       |
| Вторая группа сталей                     |                      |                   |      |       |      |      |      |                                                          |
| 11                                       | 1,2-4-4-1,5          | 1,12              | 3,97 | 4,36  | 1,45 | —    | —    | 56                                                       |
| 12                                       | 1,0-4-4-3            | 0,96              | 3,79 | 4,69  | 2,92 | —    | —    | 62                                                       |
| 13                                       | 1,2-4-4-3            | 1,15              | 3,65 | 4,58  | 3,04 | —    | —    | 61                                                       |
| 14                                       | 1,3-4-4-3            | 1,30              | 3,71 | 4,85  | 2,88 | —    | —    | 58                                                       |
| 15                                       | 1,2-4-4-4            | 1,20              | 4,11 | 4,42  | 4,26 | —    | —    | 63                                                       |
| 16                                       | 1,2-2-4-1,5          | 1,17              | 2,30 | 4,10  | 1,45 | —    | —    | 55                                                       |
| 17                                       | 1,2-2-4-2,5          | 1,18              | 2,00 | 4,10  | 2,72 | —    | —    | 61                                                       |
| 18                                       | 0,8-2-4-4,5          | 0,85              | 2,05 | 4,31  | 4,80 | —    | —    | 61                                                       |
| 19                                       | 1,2-2-4-4,5          | 1,19              | 1,90 | 4,07  | 4,72 | —    | —    | 63                                                       |
| 20                                       | 1,3-2-4-4,5          | 1,34              | 1,94 | 4,48  | 4,77 | —    | —    | 62                                                       |
| 21                                       | 1,2-6-6-2,5          | 1,12              | 5,91 | 4,29  | 2,61 | —    | —    | 62                                                       |
| 22                                       | 1,2-8-4-2,5          | 1,14              | 7,93 | 3,69  | 2,56 | —    | —    | 64                                                       |
| Третья группа сталей—стали типа ЭИ184    |                      |                   |      |       |      |      |      |                                                          |
| 23                                       | 0,6-4-8-2            | 0,63              | 3,90 | 7,61  | 1,97 | —    | —    | 61                                                       |
| 24                                       | 0,7-4-8-2            | 0,72              | 3,89 | 7,77  | 1,80 | —    | —    | 58                                                       |
| 25                                       | 0,9-4-8-2            | 0,88              | 3,93 | 8,08  | 1,85 | —    | —    | 58                                                       |
| 26                                       | 1,0-4-8-2            | 0,99              | 3,86 | 8,01  | 1,91 | —    | —    | 57                                                       |
| 27                                       | 1,2-4-8-2            | 1,17              | 3,71 | 8,16  | 2,11 | —    | —    | 55                                                       |
| Четвертая группа сталей—стали типа ЭИ172 |                      |                   |      |       |      |      |      |                                                          |
| 28                                       | 1,0-0-12-3-2         | 0,96              | —    | 11,69 | 3,16 | 2,06 | —    | 58                                                       |
| 29                                       | 1,3-0-12-3-2         | 1,30              | —    | 11,55 | 2,98 | 2,34 | —    | 57                                                       |
| 30                                       | 1,0-0-12-5-2         | 0,96              | —    | 11,44 | 5,04 | 2,28 | —    | 41                                                       |
| 31                                       | 1,3-0-12-5-2         | 1,30              | —    | 11,32 | 4,91 | 2,30 | —    | 59                                                       |
| 32                                       | 1,0-0-12-0-2         | 1,00              | —    | 11,23 | —    | 2,18 | —    | 34                                                       |

ПРИМЕЧАНИЕ: В обозначении сталей цифры указывают примерное содержание углерода и легирующих элементов в весовых процентах в следующем порядке: углерода, вольфрама, хрома и ванадия.

В сталях четвертой группы пятая цифра указывает примерное содержание кремния.

с 2 до 4 % в литой стали, имеющей 1, 0 % углерода, 4 % хрома и 10 % вольфрама, приводит к резкому повышению стойкости литого инструмента.

Вторая группа сталей включает маловольфрамовые хромо-ванадиевые стали. Выделение этой группы имело целью определение влияния вольфрама на свойства литой малолегированной быстрорежущей стали.

Единого мнения об оптимальном содержании вольфрама в быстрорежущей стали нет. По данным А. П. Гуляева [4] в твердом растворе закаленной быстрорежущей стали может растворяться не более 7—8 % вольфрама, сверх этого количества вольфрам используется нерационально, так как уходит на образование первичных карбидов, которые никакого участия в повышении красностойкости не принимают. И. С. Кватер [2] отмечает, что литая быстрорежущая сталь с 18 % вольфрама является излишне легированной и должна быть заменена более экономно легированной сталью с 9—11 % вольфрама. Гудремон [10] исследовал быстрорежущие стали с 25—28 % и 12—14 % вольфрама и установил, что первые не дают повышения производительности по сравнению со вторыми.

Влияние хрома на свойства кованой малолегированной быстрорежущей стали рассмотрено в работе А. П. Гуляева [4]. Наилучшие режущие свойства при этом были обнаружены при содержании хрома, равном 4 %. Исходя из этого, содержание хрома как в первой, так и во второй группе сталей нами было принято равным 4—4,5 %.

Третья группа сталей включает стали типа ЭИ184 с различным содержанием углерода. Хром и вольфрам оставались на уровне их содержания в кованой стали ЭИ184. Содержание ванадия было взято равным 2 %.

Четвертая группа сталей представляет стали типа ЭИ172. Исследование их преследовало ту же цель, что и сталей третьей группы—выяснить возможность изготовления литого инструмента из высокохромистых сталей отливкой в металлическую форму.

Для выплавки всех групп исследованных сталей были использованы отходы стали ШХ-15, малоуглеродистая сталь 10 для снижения содержания углерода, хромистый белый чугун для повышения содержания углерода и ферросплавы.

Плавка сталей производилась в высокочастотной печи. После окончания плавки производилось раскисление стали алюминием и силикокальцием из расчета по 0,1 % каждого. Перед разливкой стали вводился модификатор—бор в виде ферробора из расчета 0,025 % В.

Заливка формы сталью производилась непосредственно из тигля при температуре 1500—1540°, контролируемой оптическим пирометром. Вес каждой плавки составлял 1 кг. Литье производилось на литейной центробежной машине при 400—500 об/мин в сборную металлическую форму. Одновременно отливало 6 пластинок клиновой формы с рифлениями размером 40×25×10 мм. Отлитые пластинки охлаждались вместе с кокилем до комнатной температуры, после чего отделялись от литника. Тонкое сечение пластинок способствовало совмещению закалки с отливкой. Термическая обработка их сводилась лишь к отпуску.

#### Микроструктура исследованных сталей

Режущие и механические свойства литого инструмента, закалка которого совмещается с отливкой, определяются структурой, формирующейся при кристаллизации. При одинаковых условиях кристаллизации изменение состава оказывает влияние на литую структуру стали.

При изучении структуры сталей первой и второй группы было установлено, что повышение содержания ванадия до 2,5—3,0 % приводит к появлению в структуре закаленной стали скрытокристаллического мартенсита, вместо игольчатого, к уменьшению количества и устойчивости остаточного аустенита. Это видно при сравнении твердости закаленных сталей 1,2—4—4—1,5 и 1,2—4—4—4 или сталей 1,2—2—4—1,5 и 1,2—2—4—4,5. Твердости сталей 1,2—4—4—1,5 и 1,2—2—4—1,5 соответственно равны 56 и 55 по  $R_c$ , а сталей с большим содержанием ванадия 63 по  $R_c$ .

Увеличение содержания ванадия до 4—4,5 % приводит к образованию в структуре темной составляющей. Появление этой составляющей является признаком неоднородности структуры стали и ухудшения ее свойств. Состав и термическая обработка стали должны подбираться так, чтобы исключить эту составляющую из структуры стали. Увеличение содержания ванадия сверх 3,0 % отрицательно сказывается и на строении эвтектики: тонкосетчатое строение эвтектики сменяется на грубокустистое, напоминающее карбидную ликвацию в кованой стали.

Вольфрам при увеличении содержания его в стали действует на структуру закаленной стали слабее ванадия. Это можно объяснить тем, что обеднение углеродом твердого раствора при увеличении в стали содержания вольфрама происходит медленнее, чем при увеличении в ней содержания ванадия, так как образующиеся карбиды вольфрама содержат меньшее количество углерода, чем карбиды ванадия. Например, карбид  $Fe_3W_3C$  содержит в 11 раз меньше углерода, чем карбид  $VC$ . Менее интенсивное действие вольфрама на структуру исследованных сталей по сравнению с ванадием видно и из следующего примера. Увеличение содержания вольфрама в стали в 4 раза (стали 1,2—2—4—2,5 и 1,2—8—4—2,5) повысило твердость на 3 ед. по  $R_c$ , а увеличение содержания ванадия в стали в 2 раза (стали 1,2—4—4—1,5 и 1,2—4—4—3) повысило твердость с 56 до 61 ед. по  $R_c$ .

Повышение содержания вольфрама с 2 до 8 % не вызывает качественных изменений структуры, а увеличивает количество мартенсита и уменьшает устойчивость остаточного аустенита. Эвтектика сталей с вольфрамом образует сплошные участки, окаймляющие первичные зерна. Количество ее увеличивается при повышении содержания вольфрама и стали.

Углерод при повышении содержания его в стали увеличивает количество остаточного аустенита, делает его более устойчивым против отпуска и вызывает изменение строения эвтектики от тонкосетчатого до грубого строения. При повышении содержания углерода в стали выше 1,1 % происходит также замена мелкоигольчатого мартенсита крупноигольчатым. Действие углерода на структуру стали можно иллюстрировать на примере сталей 1,3—4—4—3 и 1,0—4—4—3. Структуры этих сталей после трехкратного отпуска при  $560^\circ$  отличаются друг от друга. В первой стали больше остаточного аустенита, иглы мартенсита крупнее, а эвтектика имеет более грубое строение. Различие в структуре этих сталей определило и различие в их стойкости. Более низкую стойкость стали 1,3—4—4—3 в сравнении со сталью 1,0—4—4—3 можно отнести за счет грубой эвтектики и крупноигольчатого мартенсита.

Основной особенностью структуры высокохромистых сталей типа ЭИ184 и ЭИ172 в закаленном состоянии является наличие значительного количества остаточного аустенита. Однако устойчивость аусте-

Таблица 2

Распределение легирующих элементов между фазами малолегированной  
литой быстрорежущей стали после закалки (литья)

| №№<br>пп | Обозначение<br>стали | Кол-во<br>карбидов, % | Химический состав осадка, % |       |       | Распределение легирующих элементов, % |      |      |                    |      |      |
|----------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|-------|-------|---------------------------------------|------|------|--------------------|------|------|
|          |                      |                       |                             |       |       | в карбидах                            |      |      | в твердом растворе |      |      |
|          |                      |                       | W                           | Cr    | V     | W                                     | Cr   | V    | W                  | Cr   | V    |
| 1        | 1,0-0-4-0            | 7,00                  | —                           | 4,90  | —     | —                                     | 0,35 | —    | —                  | 3,59 | —    |
| 2        | 1,0-0-4-1,5          | 5,75                  | —                           | 6,93  | 10,80 | —                                     | 0,40 | 0,51 | —                  | 3,79 | 1,12 |
| 3        | 0,8-0-4-3            | 3,13                  | —                           | 6,23  | 23,24 | —                                     | 0,19 | 0,72 | —                  | 3,82 | 2,18 |
| 4        | 1,2-0-4-3            | 5,25                  | —                           | 7,26  | 19,21 | —                                     | 0,38 | 1,00 | —                  | 4,42 | 2,00 |
| 5        | 1,3-0-4-3            | 7,64                  | —                           | 6,89  | 20,30 | —                                     | 0,52 | 1,55 | —                  | 3,79 | 1,45 |
| 6        | 1,3-0-4-4            | 7,11                  | —                           | 6,08  | 36,25 | —                                     | 0,42 | 2,57 | —                  | 3,42 | 1,62 |
| 7        | 1,2-4-4-1,5          | 8,90                  | 18,94                       | 7,35  | 6,30  | 1,68                                  | 0,62 | 0,56 | 2,29               | 3,74 | 0,89 |
| 8        | 1,0-4-4-3            | 5,90                  | 21,64                       | 7,25  | 15,78 | 1,30                                  | 0,43 | 0,95 | 2,49               | 4,26 | 1,97 |
| 9        | 1,2-4-4-3            | 7,20                  | 19,39                       | 7,23  | 17,88 | 1,40                                  | 0,52 | 1,28 | 2,25               | 4,06 | 1,76 |
| 10       | 1,3-4-4-3            | 10,23                 | 20,22                       | 10,73 | 15,29 | 2,06                                  | 1,09 | 1,56 | 1,65               | 3,76 | 1,32 |
| 11       | 1,2-4-4-4            | 8,37                  | 21,58                       | 5,78  | 29,64 | 1,81                                  | 0,48 | 2,48 | 2,30               | 3,92 | 1,78 |
| 12       | 1,2-2-4-1,5          | 7,20                  | 9,70                        | 7,60  | 7,09  | 0,70                                  | 0,54 | 0,51 | 1,60               | 3,56 | 0,94 |
| 13       | 1,2-2-4-2,5          | 6,45                  | 10,34                       | 6,86  | 19,65 | 0,67                                  | 0,44 | 1,26 | 1,33               | 3,66 | 1,46 |
| 14       | 0,8-2-4-4,5          | 4,06                  | 11,74                       | 5,68  | 29,42 | 0,47                                  | 0,28 | 1,17 | 1,58               | 4,08 | 3,06 |
| 15       | 1,2-2-4-4,5          | 6,90                  | 15,92                       | 5,33  | 35,53 | 1,08                                  | 0,37 | 2,45 | 0,82               | 4,10 | 2,27 |
| 16       | 1,3-2-4-4,5          | 8,02                  | 12,38                       | 6,03  | 31,95 | 0,99                                  | 0,48 | 2,56 | 0,95               | 4,00 | 2,21 |
| 17       | 1,2-6-4-2,5          | 8,65                  | 27,60                       | 6,62  | 15,22 | 2,37                                  | 0,56 | 1,31 | 3,54               | 3,73 | 1,30 |
| 18       | 1,2-8-4-2,5          | 9,78                  | 37,28                       | 5,34  | 14,57 | 3,65                                  | 0,52 | 1,43 | 4,28               | 3,17 | 1,13 |
| 19       | 1,0-4-8-2            | 7,00                  | 13,20                       | 14,70 | 6,78  | 0,93                                  | 1,03 | 0,47 | 2,90               | 6,98 | 1,44 |
| 20       | 1,2-4-8-2            | 10,02                 | 12,77                       | 15,85 | 6,01  | 1,30                                  | 1,60 | 0,61 | 2,41               | 6,55 | 1,50 |

нита против отпуска у этих сталей различна. Большое количество остаточного аустенита и низкая его устойчивость при отпуске у сталей типа ЭИ172 объясняется высокой легированностью аустенита хромом, который имеет большую скорость диффузии и образует легко коагулирующие карбиды.

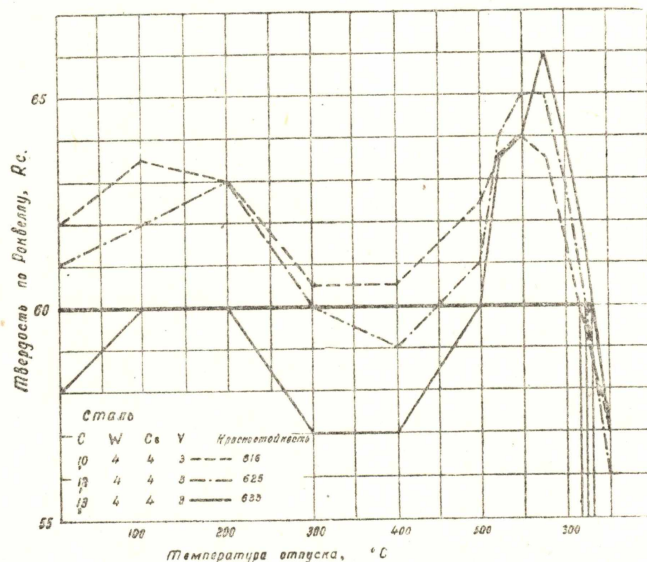
Остаточный аустенит сталей типа ЭИ184 отличается повышенной устойчивостью против отпуска по сравнению с аустенитом сталей первой и второй групп, что следует объяснить большой концентрацией углерода в аустените первых сталей. Последнее подтверждается сравнением химического состава карбидов сталей (1,0—1,2)—4—8—2 и (1,0—1,2)—4—4—3. При равном содержании вольфрама и разнице ванадия в один процент в этих сталях содержание вольфрама и ванадия в карбидах первых сталей в 2—2,5 раза меньше, чем во вторых (табл. 2). Меньшее содержание в карбиде сильных карбидообразующих элементов, дающих богатые углеродом карбиды, в меньшей мере будет обеднять твердый раствор углеродом.

Необходимо отметить наличие резко выраженной внутрикристаллической ликвации в сталях типа ЭИ184. О ней можно судить по расположению остаточного аустенита на периферии и мартенсита в середине зерен. Мартенсит образуется из менее легированного твердого раствора, закристаллизовавшегося первым, чем твердый раствор периферии зерен. Неоднородность структуры сталей этого типа определила пониженную стойкость по сравнению со сталями второй группы.

#### Поведение при отпуске и красностойкость малолегированных литых быстрорежущих сталей

Для изучения поведения малолегированных литых быстрорежущих сталей при отпуске были выполнены последовательный отпуск в температурном интервале от 100 до 650° и многократный отпуск при температурах 560 и 600°. Время выдержки при отпуске — один час.

Кривые последовательного отпуска исследованных сталей (фиг. 1)



Фиг. 1. Влияние температуры последовательных отпусков на твердость литой стали.

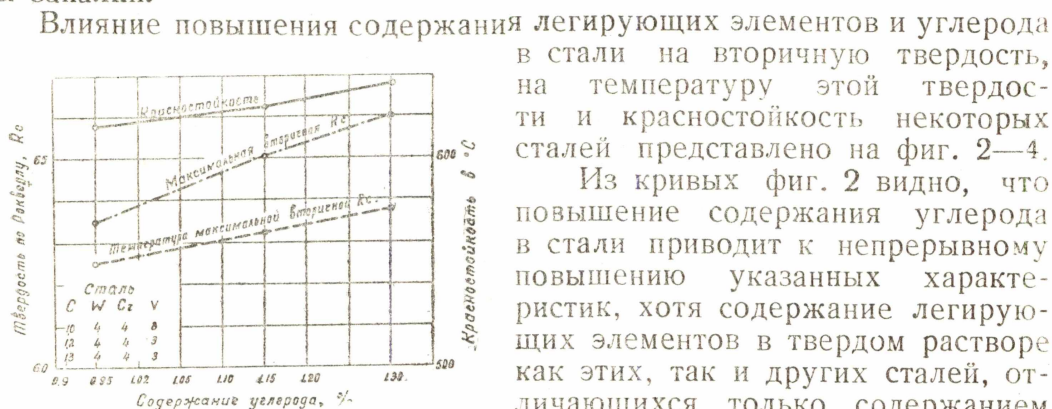
по своему характеру не отличаются от кривых, получаемых при последовательном отпуске ковanej или литой быстрорежущей стали

обычного состава. Все кривые характеризуются снижением твердости в интервале температур 300—400°. С температур выше 400° начинается интенсивное возрастание твердости стали, которое зависит от состава стали. Наиболее сильное возрастание вторичной твердости происходит при отпуске в пределах 500—600°. После достижения максимальной вторичной твердости кривая изменения твердости снижается. Преобладающими процессами здесь являются процессы распада мартенсита на феррито-карбидную смесь. Интенсивность снижения твердости зависит от скорости диффузии и концентрации легирующих элементов и углерода в альфа твердом растворе, от задерживающего влияния этих элементов на выделение углерода из него, а также от свойств, степени дисперсности и способности к коагуляции карбидной фазы. Резкое падение твердости происходит у всех сталей без вольфрама и с низким содержанием ванадия. Такое поведение этих сталей при отпуске следует объяснить меньшей стойкостью мартенсита и большей склонностью к коагуляции карбидов хрома по сравнению с мартенситом и карбидами сталей легированных ванадием и вольфрамом.

При сопоставлении данных, полученных при последовательном отпуске исследованных сталей, можно выяснить влияние легирующих элементов и углерода на максимальное значение вторичной твердости, ее температуру и красностойкость стали.

Для определения красностойкости имеется несколько методов [4, 11]. Характеристикой красностойкости в нашем случае является температура, при которой кривая изменения твердости в конце последовательных отпусков (фиг. 1) снижается до значения 60 ед. по  $R_c$ . Красностойкость можно характеризовать и твердостью после шестикратного отпуска при 560 или 600°.

Значение указанных характеристик стали определяется легированностью твердого раствора, зависящей от состава стали и температуры закалики.



Фиг. 2. Влияние содержания углерода на максимальное значение 2-ой твердости, температуру этой твердости и на красностойкость стали.

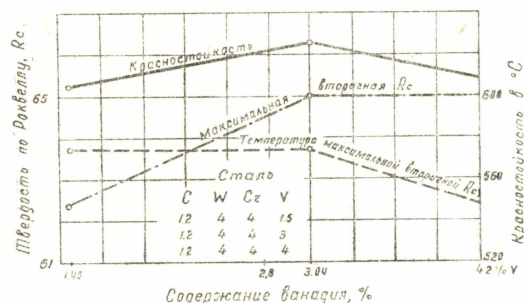
Из кривых фиг. 2 видно, что повышение содержания углерода в стали приводит к непрерывному повышению указанных характеристик, хотя содержание легирующих элементов в твердом растворе как этих, так и других сталей, отличающихся только содержанием углерода, уменьшается за счет увеличения количества карбидов (табл. 2).

Повышение красностойкости и вторичной твердости в таких сталях можно объяснить увеличением концентрации углерода в аустените. При добавке углерода к стали происходит изменение химического состава кристаллизующихся фаз—обеднение твердого раствора легирующими элементами и обогащение его углеродом.

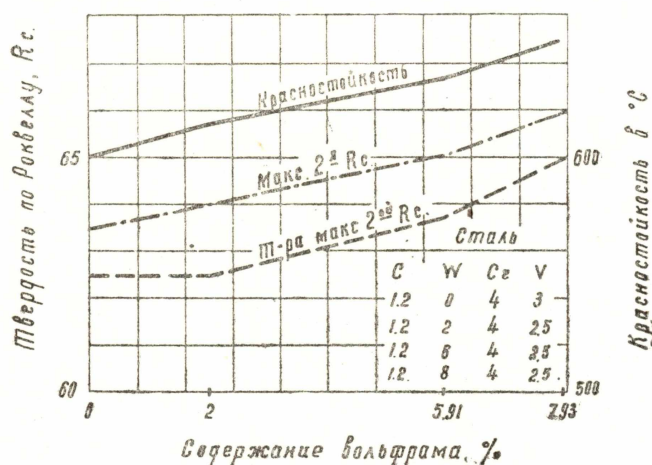
Действие ванадия при увеличении его содержания в стали на те же характеристики сталей видно из фиг. 3. При увеличении содержания ванадия до 3 % растет красностойкость и максимальное

значение вторичной твердости. Дальнейшее повышение содержания ванадия приводит к снижению красностойкости и температуры, соответствующей максимальному значению вторичной твердости. Такое действие ванадия объясняется обеднением твердого раствора углеродом при образовании богатого углеродом карбида ванадия. Это подтверждается данными фазового анализа сталей, отличающихся содержанием ванадия. Например, более высокое содержание ванадия (29,6 %) в карбидном осадке стали 1,2—4—4—4 по сравнению с его содержанием (17,9 %) в осадке стали 1,2—4—4—3 значительно обеднило твердый раствор первой стали углеродом. Последнее и привело к образованию менее стойкой металлической основы стали 1,2—4—

—4—4, быстрее разупрочняющейся при последующих нагревах во время отпуска или при резании. Легированность твердого раствора ванадием приведенных сталей почти не отличается, а легированность ванадием карбидов стали 1,2—4—4—4 примерно в 2 раза больше, чем карбидов 1,2—4—4—3 (табл. 2). Повышение красностойкости и других характеристик при увеличении содержания ванадия до 3,0 % объясняется увеличением легированности твердого раствора ванадием. Например, концентрация (0,94 %) ванадия в твердом растворе стали 1,2—4—4—1,5 примерно в 2 раза меньше (1,78 %), чем в стали 1,2—4—4—3. Стали с большей концентрацией ванадия в твер-



Фиг. 3. Влияние содержания ванадия на максимальное значение 2 ой твердости, ее температуру и на красностойкость стали.



Фиг. 4. Влияние содержания вольфрама на величину максимальной вторичной твердости, ее температуру и на красностойкость стали

дом растворе менее склонны к разупрочнению при отпуске как за счет большей легированности мартенсита, так и за счет образования в большем количестве мелкодисперсных, трудно коагулирующихся карбидов. Дальнейшее повышение содержания ванадия (сталь 1,2—4—4—4) до 4,2 не вызвало повышения насыщения твердого раствора ванадием (1,78 %), так как он пошел на образование карбидов. Сравнивая данные фазового анализа сталей 1,2—4—4—(1,5—3—4), можно

заклучить, что для насыщения кристаллизующегося твердого раствора этих сталей требуется около 1,8—2,0 % ванадия из общего содержания его в стали. Остальная часть ванадия уходит на образование первичных карбидов, которые не повышают красностойкость стали, а твердый раствор при этом сильно обедняется углеродом. Из сказанного следует, что оптимальным количеством ванадия в исследованных сталях с 0,9—1,1 % углерода является 2,5—3,0 %.

Увеличение содержания вольфрама в рассматриваемых пределах (до 8 %) в литых малолегированных сталях приводит к непрерывному повышению максимального значения вторичной твердости и красностойкости, что связано с увеличением легированности твердого раствора вольфрамом при одновременном повышении содержания его в стали (табл. 2).

Результатом увеличения легированности твердого раствора вольфрамом и замедленного выделения его карбидов из твердого раствора

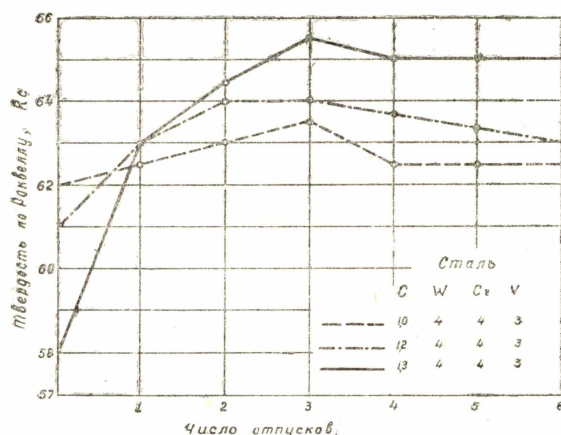
при нагреве является повышение красностойкости, максимального значения вторичной твердости и температуры этой твердости (фиг. 4).

Повышение содержания хрома в рассматриваемых сталях иначе влияет на красностойкость, максимальную величину вторичной твердости, чем повышение содержания в стали вольфрама, ванадия и углерода.

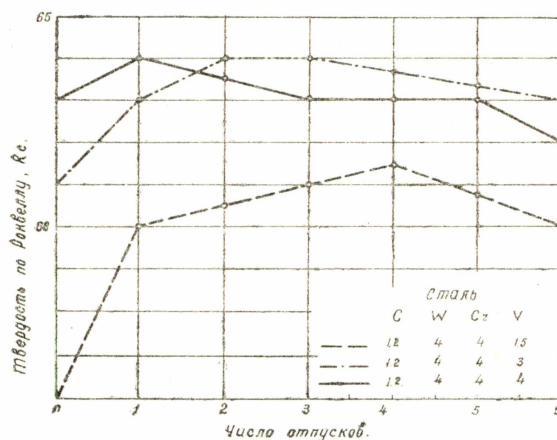
Наиболее резко сказалось отрицательное действие повышенного содержания хрома в сталях

Фиг. 5. Влияние многократного отпуска при 560° на твердость литой стали.

типа ЭИ172. Эти стали показали сравнительно высокую вторичную твердость, но при низких температурах отпуска. Максимальное значение вторичной твердости стали 1,0—0—12—3—2 63 ед. по  $R_c$  получено при температуре 525°, а у стали 1,3—0—12—3—2 66 по  $R_c$  — при 550°. Характерным для этих сталей является резкое падение вторичной твердости после достижения ею максимального значения. Например, у стали 1,3—0—12—3—2 твердость с максимального значения 66 по  $R_c$  при 550° падает до 55 при температуре отпуска 575°. Причиной столь низкой стойкости твердого раствора, легированного хромом, является большая скорость диффузии хрома уже при низких температурах отпуска (400—500°). На величину вторичной твердости ока-

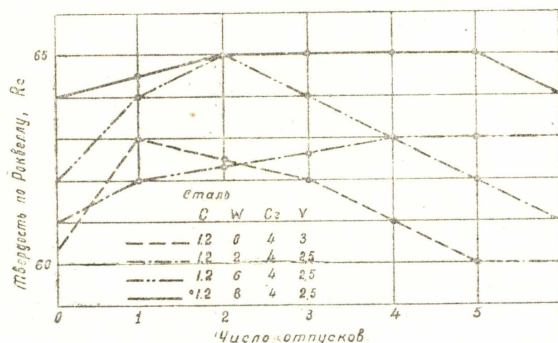


Фиг. 6. Влияние многократного отпуска при 560° на твердость литой стали.



зывает влияние не только температура и продолжительность отпуска, но и его кратность. Изучение поведения исследуемых сталей при многократном отпуске проводилось при двух температурах—560 и 600°. Отпуск при 560° дал возможность определить оптимальное количество отпусков для получения максимальной твердости инструмента из этой стали. Отпуск при 600° служил для выяснения поведения исследуемых сталей при высокотемпературном нагреве. Продолжительность каждого отпуса равнялась одному часу. Изменение твердости некоторых сталей при многократном отпуске при температуре 560° представлено на фиг. 5—7. Анализ полученных результатов подтверждает сделанные ранее выводы о влиянии изменения содержания различных элементов в стали на ее устойчивость при нагреве. Так, устойчивость мартенсита стали против разупрочнения в процессе многократных отпусков возрастает с увеличением в стали содержания углерода.

Весьма благоприятно действует увеличение содержания в стали вольфрама—чем больше содержится в стали вольфрама, тем выше твердость после любого числа отпусков. Увеличение содержания ванадия оказывает положительное воздействие лишь до 2,5—3,0 %.



Фиг. 7. Влияние многократного отпуса при 560° на твердость литой стали.

### Режущие свойства сталей

Полученные данные по красностойкости литых малолегированных быстрорежущих сталей позволили предположить, что режущий инструмент из некоторых сталей будет иметь достаточно высокую стойкость. Испытывались резанием в заводских условиях 11 сталей. Задачей испытания являлось получение сравнительной оценки режущих свойств малолегированных литых быстрорежущих сталей различного состава. Так как закалка совмещалась с отливкой, то термическая обработка резцов из этих сталей сводилась лишь к отпуску по оптимальному режиму (табл. 3).

Отлитые и отпущенные пластинки механически крепились в специально изготовленные державки, после чего подвергались заточке. Условия резания были выбраны для получения часовой стойкости резцов из кованой стали Р9. Для сравнительной оценки режущих свойств исследуемых сталей при тех же условиях испытывались резцы из кованой стали Р9 после термической обработки по стандартным режимам.

При испытании резанием в качестве обрабатываемого материала использовались заготовки для валков из стали 40 с твердостью по Бринелю 180. Испытания производились на токарном станке при продольной обточке без охлаждения. Глубина резания  $t = 2 \text{ мм}$ , подача  $S = 0,3 \text{ мм/об}$ . Все резцы испытывались при скорости резания, равной  $30 \text{ м/мин}$ , соответствующей 60-минутной стойкости резцов из кованой стали Р9. Критерием затупления служила полная посадка резцов. Полученные результаты по стойкости сталей приведены в табл. 3.

Таблица 3

| №№<br>пп | Сталь       | Кратность отпуска при 560° | Твердость после отпуска при 560° по R <sub>c</sub> | Стойкость в проц. по отношению к резцам из кованой стали Р9, принятой за 100 % |
|----------|-------------|----------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 1,3—0—4—4   | 2                          | 62                                                 | 6                                                                              |
| 2        | 1,2—0—4—3   | 2                          | 62                                                 | 8                                                                              |
| 3        | 1,2—2—4—2,5 | 3                          | 62                                                 | 26                                                                             |
| 4        | 1,0—4—4—3   | 3                          | 63                                                 | 110                                                                            |
| 5        | 1,2—4—4—3   | 3                          | 64                                                 | 94                                                                             |
| 6        | 1,3—4—4—3   | 3                          | 65                                                 | 80                                                                             |
| 7        | 1,2—6—4—2,5 | 3                          | 64                                                 | 122                                                                            |
| 8        | 1,2—8—4—2,5 | 3                          | 65                                                 | 140                                                                            |
| 9        | 1,2—4—4—4   | 2                          | 63                                                 | 86                                                                             |
| 10       | 1,0—4—8—2   | 4                          | 63                                                 | 62                                                                             |
| 11       | 1,2—4—8—2   | 4                          | 63                                                 | 70                                                                             |

Данные о режущих свойствах испытаний сталей позволяют сделать следующие заключения.

При повышении содержания углерода в литых малолегированных быстрорежущих сталях стойкость резцов уменьшается, хотя красностойкость при этом растет. Оптимальным содержанием углерода в исследуемых сталях с точки зрения максимальной стойкости следует считать 0,9—1,1 %. Снижение режущих свойств при дальнейшем повышении содержания углерода в стали объясняется повышенной хрупкостью резцов, обусловленной крупноигльчатостью мартенсита и грубым строением эвтектики.

Повышение содержания вольфрама в исследуемых сталях непрерывно увеличивает стойкость резцов за счет увеличения легированности твердого раствора вольфрамом.

Резцы из литой стали состава 0,9—1,1 % углерода, 2,5—3,0 % ванадия, 4—4,5 % хрома и вольфрама не ниже 3,5—4,0 % имеют стойкость, равную стойкости резцов из кованой стали Р9.

Оптимальным содержанием ванадия в исследуемых сталях следует считать 2,5—3,0 %. Увеличение содержания ванадия в стали до 4—4,5 % в соответствии со снижением красностойкости снижает стойкость резцов из таких сталей.

Резцы из литых сталей типа ЭИ184 имеют низкую стойкость в сравнении с резцами из опытных сталей (1,0—1,2)—4—4—3, которые содержат на 4% хрома меньше и больше на 1 % ванадия, чем первые. Поэтому оптимальным содержанием хрома в литых малолегированных быстрорежущих сталях следует считать 4—4,5 %.

Таким образом, при литье в металлическую форму пластинок небольшого сечения, закалка которых происходит в процессе отливки, можно подобрать состав малолегированной стали, не уступающей по стойкости резцам из кованой стали Р9.

Такой сталью по результатам стойкостных испытаний является сталь следующего состава: 0,9—1,1 % углерода, 3,5—4,0 % вольфрама, 2,5—3,0 % ванадия и 4—4,5 % хрома.

## Выводы

1. В литых малолегированных быстрорежущих сталях при изменении содержания в них легирующих элементов и углерода характер изменения твердости, количества и устойчивости остаточного аустенита аналогичен их изменению в ковanej стали.

2. Углерод значительно повышает красностойкость стали, но увеличивает количество и устойчивость остаточного аустенита и повышает хрупкость стали. Повышение содержания углерода в стали обедняет твердый раствор легирующими элементами, обогащает его углеродом и увеличивает количество карбидов. Содержание углерода в литых малолегированных сталях целесообразно повышать только до 1,1 %.

3. Повышение содержания ванадия в исследованных сталях приводит к качественным изменениям структуры, которые выражаются при увеличении содержания его до 3,0 % в замене обычного мартенсита скрыто кристаллическим, а при увеличении содержания до 4—4,5 %—к появлению в структуре темной составляющей и замене сетчатого строения эвтектики кустистым. Ванадий повышает красностойкость и стойкость при резании литых малолегированных быстрорежущих сталей, содержащих 0,9—1,1 % углерода, но лишь при содержании его до 3,0 %. При этом ванадий оказывает благоприятное влияние на сталь, уменьшая количество и устойчивость остаточного аустенита. При дальнейшем увеличении содержания ванадия в стали красностойкость и стойкость при резании снижается за счет сильного обеднения твердого раствора углеродом.

Ванадий может быть использован для улучшения режущих свойств стали только в сочетании с другими легирующими элементами—вольфрамом и хромом, так как малолегированные литые быстрорежущие стали без вольфрама с повышенным содержанием ванадия не обладают достаточно высокой красностойкостью, а при испытании резанием показали низкие режущие свойства.

4. Рост содержания вольфрама в стали непрерывно повышает красностойкость стали, уменьшает количество и устойчивость остаточного аустенита за счет обеднения твердого раствора углеродом. При этом обеднение твердого раствора углеродом происходит менее интенсивно, чем при увеличении в стали содержания ванадия. Минимальным содержанием вольфрама в малолегированной литой быстрорежущей стали для изготовления из нее достаточно работоспособного инструмента является 3,5—4,0 %.

5. Повышение содержания хрома более 4—4,5 в литой малолегированной быстрорежущей стали не дает положительных результатов, так как хром снижает красностойкость стали, увеличивает количество и устойчивость остаточного аустенита.

6. Малолегированная литая быстрорежущая сталь состава 0,9—1,1 % углерода, 4—4,5 % хрома, 3,5—4,0 % вольфрама и 2,5—3,0 % ванадия равноценна по режущим свойствам ковanej быстрорежущей стали типа Р9, а при большом содержании вольфрама (6—8 %) она обладает более высокими режущими свойствами. Термическая обработка инструмента малого сечения из такой стали при отливке в металлическую форму сводится к трехкратному отпуску при 560°. Сталь указанного состава рекомендуется для изготовления литого инструмента отливкой в металлическую форму.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев Т. А., Ревис И. А. Структура и свойства литого инструмента из быстрорежущей стали, Машгиз, 1949.
2. Кватер И. С. Литые быстрорежущие стали, Машгиз, 1952.
3. Тушинский Л. И. Исследование литых низко- и средне-легированных быстрорежущих сталей, Автореферат диссертации, Ленинград, 1953.
4. Гуляев А. П. Теория быстрорежущей стали, Станки и инструмент, № 2—3, 1946.
5. Тютёва Н. Д., Тихонов И. Т. К вопросу о влиянии содержания углерода и способа отливки на свойства литых быстрорежущих сталей, Известия Томского политехнического института, т. 68, в. 1, 1951.
6. Кватер И. С. Влияние ванадия на свойства быстрорежущей стали, Вестник машиностроения, № 11, 1949.
7. Гуляев А. П. Ванадий в малолегированных быстрорежущих сталях, Сталь № 4, 1941.
8. Горюнов И. И. Отливка инструмента в металлические формы, Литой и наплавленный инструмент, Сборник статей, Машгиз, 1951.
9. Рахштадт А. Г. и Геллер Ю. А. Структура и свойства быстрорежущей стали с повышенным содержанием ванадия. Сборник „Структура и прочность металлов“, Машгиз, 1953.
10. Гудремон Э. Учение о специальных сталях, ОНТИ—НКТП, 1937.
11. Гелле Ю. А. Метод определения красностойкости быстрорежущей стали, Заводская лаборатория, № 3, 1947.