

**О.Г.Сидоренко, И.П.Федорова, А.П.Сухой**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ АРМАТУРНОГО ПРОКАТА, ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЯЕМОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОСОБОВ ПРЕРВАННОЙ И ПРЕРЫВИСТОЙ ЗАКАЛКИ В ПОТОКЕ ПРОКАТНОГО СТАНА**

Целью работы являлось исследование макро– и микроструктуры арматурного проката, термически упрочняемого по способу прерванной закалки в потоке стана. Установлено, что в пределах упрочняемого стержня на удалении в 0,3 – 0,4 его радиуса стабильно выявляется граница перехода от одних закономерностей формирования структуры по сечению проката к другим. Показано, что появление при упрочнении отдельных участков вырожденного перлита, а затем и последующее постепенное вытеснение ими феррито–перлитных структур, наблюдается независимо от содержания в них химических элементов.

**арматурный прокат, термическое упрочнение, прерванная закалка, структура по сечению проката**

**Постановка задачи.** Основу для разработки новой в свое время для металлургической промышленности технологии термического упрочнения проката в потоке сортопрокатных станов составил способ прерванной закалки. При его применении интенсивное охлаждение со сверхкритической скоростью ведут до образования у поверхности проката мартенситного слоя определенной толщины, после чего интенсивное охлаждение прерывают. В результате этого, за исключением мартенсита у поверхности, все остальное сечение проката в момент прерывания охлаждения остается в аустенитном состоянии. Момент завершения интенсивного охлаждения при применении способа прерванной закалки является также моментом начала процесса самопроизвольного выравнивания температуры по сечению проката, а также начала замедленного охлаждения проката на воздухе.

Установлено, что в пределах одного и того же термически упрочняемого стержня на удалении в 0,3 – 0,4 его радиуса может стабильно выявляться некоторая граница, по которой достаточно четко наблюдается переход от одних закономерностей формирования макро– и микроструктуры по сечению проката к другим. Некоторая неопределенность удаления от поверхности арматурного проката границы распространения равновеликих объемов объясняется сложной конфигурацией сечения стержней. У строго цилиндрического стержня, например, удаление подобной границы от поверхности составляет 0,293 радиуса; у листового проката эта граница должна находиться ровно на половине расстояния от поверхности до осевой плоскости. Арматурный же прокат имеет периодический профиль с более или менее значительной овальностью. Поэтому удаление услов-

ной границы равновеликих объемов от поверхности не может быть постоянным в пределах сечения даже одного и того же стержня.

**Целью работы** являлось исследование макро– и микроструктуры арматурного проката, термически упрочняемого по способу прерванной закалки в потоке стана.

**Изложение основных материалов исследования.** На рис.1 приведены кривая (1) изменения температуры поверхности и кривая (2), соответствующая изменениям температуры в слое, удаленном от поверхности на величину равную 0,293 радиуса стержня (1,758 мм), и условно разделяющим стержень на равновеликие объемы. Эта кривая свидетельствует, что температура в названном слое, непрерывно понижающаяся в течение периода интенсивного охлаждения, после его завершения понижение прекращает и далее остается постоянной и равной среднemasсовой температуре. Кривая (3) (рис.1) показывает изменение температуры в сердцевинном объеме стержня.

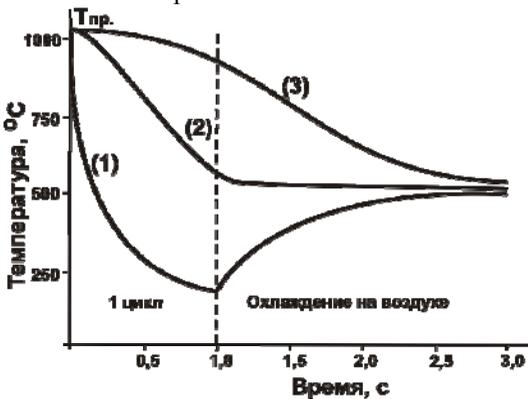


Рис.1. Изменение температуры круглого стержня диаметром 12 мм при термическом упрочнении с применением прерванной закалки у поверхности (1), в слое удаленном от поверхности на 0,293 радиуса (2) и в центре (3).

Отличие режимов упрочнения с применением прерывистой закалки состоит, в принципе, лишь в том, что непрерывный период интенсивного охлаждения разбивают одним или несколькими периодами кратковременных пауз, в течение которых охлаждение не выполняют.

Расчеты подтвердили, что при применении и этого способа удаление от поверхности, равное 0,293 радиуса, является границей перехода от прилегающего к поверхности объема, в пределах которого наблюдаются циклические понижения и повышения температуры, с числом циклов, равным числу периодов интенсивного охлаждения, к сердцевинному объему, в котором имеет место только понижение температуры. Влияние отличия температурных изменений в объемах, прилегающих к поверхности, и осевой зоны стержней арматурного проката на формирование структуры при превращениях аустенита, сохранившегося непревращенным к моменту прерывания интенсивного охлаждения при применении для упрочнения способа прерванной закалки, было подтверждено при исследовании макро– и микроструктуры проката диаметром 12 мм, получаемого при проведении экспериментов по термическому упрочнению с непрерывным

изменением степени упрочнения по длине раската (рис. 2). Последнего достигали путем сообщения отдельным раскатам непрерывно ускоряющегося прохождения через трассу термического упрочнения.

Выявляемая при исследовании макроструктуры граница, по которой происходило изменение отражательной способности протравленной ниталем полированной поверхности поперечных сечений арматурного проката находилась на удалении 0,3 – 0,4 радиуса стержня от его рабочей поверхности. Это позволяло предположить, что появление этой границы как раз и связано с отличием по обе стороны от нее характера температурных изменений в объеме арматурного стержня при применении для упрочнения способа прерванной закалки. Это предположение подтвердили результаты исследования микроструктуры в тех объемах арматурного проката, в которых распад аустенита происходит уже после прерывания интенсивного охлаждения.

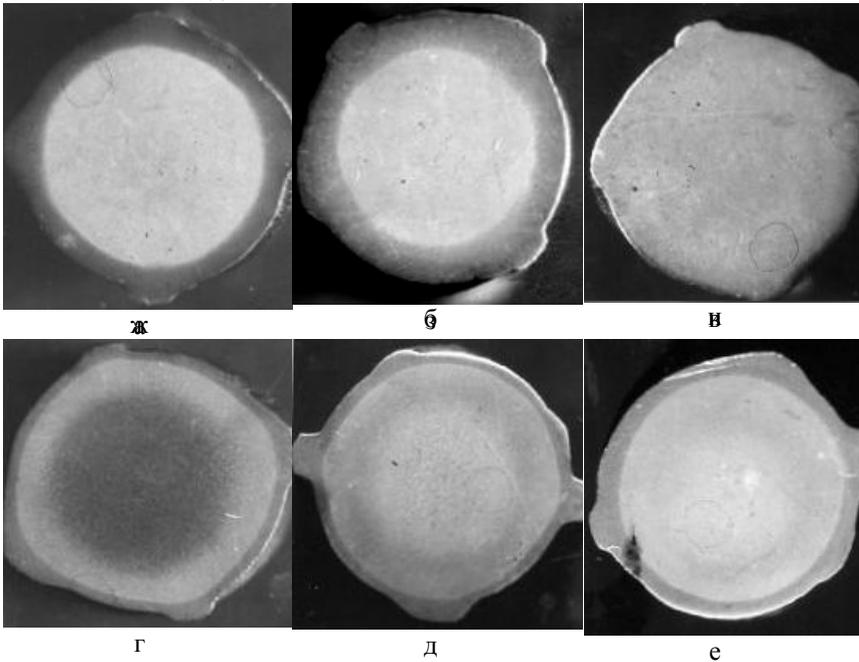
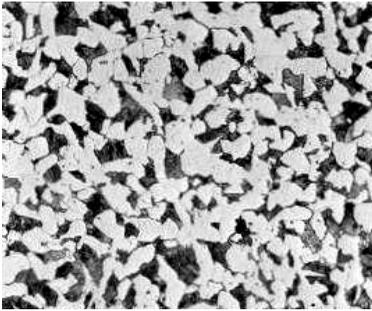


Рис.2.  $\times 5$  Макроструктура по сечению арматурного проката диаметром 12 мм в зависимости от уровня упрочнения:

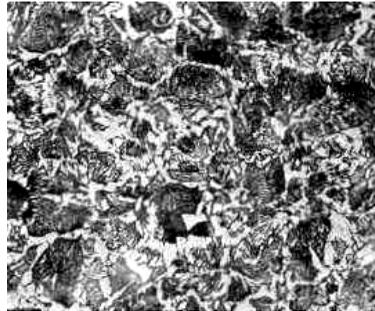
а – $\sigma_b=640 \text{ Н/мм}^2$ ;	г – $\sigma_b=690 \text{ Н/мм}^2$ ;	ж – $\sigma_b=910 \text{ Н/мм}^2$ ;
б – $\sigma_b=660 \text{ Н/мм}^2$ ;	д – $\sigma_b=730 \text{ Н/мм}^2$ ;	з – $\sigma_b=1130 \text{ Н/мм}^2$ ;
в – $\sigma_b=675 \text{ Н/мм}^2$ ;	е – $\sigma_b=790 \text{ Н/мм}^2$ ;	и – $\sigma_b=1320 \text{ Н/мм}^2$ .

Исследования влияния степени упрочнения на формирование микроструктуры в прилегающем к оси арматурных стержней объеме, в котором

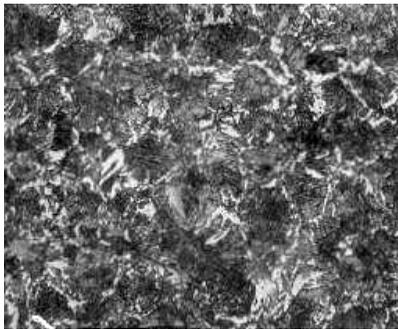
после прерывания интенсивного охлаждения имеет место только непрерывное понижение температуры, наблюдается последовательный переход микроструктуры от феррито–перлитной (рис. 3 а), к феррито–бейнитной (рис.3б), бейнитной (рис.3в), и, наконец, бейнито–мартенситной (рис. 3 г).



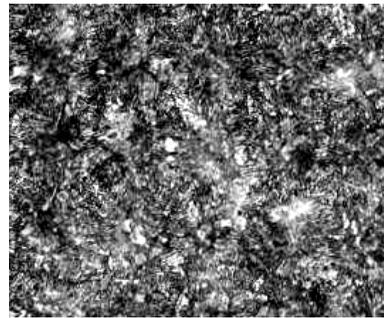
а



б



в



г

Рис.3.  $\times 500$  Изменения микроструктуры арматурного проката диаметром 12 мм в околоосевых слоях стержней в зависимости от степени упрочнения:

$$а - \sigma_b = 650 \text{ Н/мм}^2;$$

$$в - \sigma_b = 790 \text{ Н/мм}^2;$$

$$б - \sigma_b = 730 \text{ Н/мм}^2;$$

$$г - \sigma_b = 950 \text{ Н/мм}^2.$$

Подобная последовательность изменения микроструктуры в околоосевом объеме арматурного стержня подтверждает предположение о том, что здесь закономерности формирования структуры при распаде сохранившегося после прерывания интенсивного охлаждения аустенита близки к тем, которые наблюдаются при превращениях в изотермических условиях. Хотя имеются и некоторые отличия. Так, в соответствии с изотермическими диаграммами сталей с подобными исследованному химическими составами в термически упрочненном арматурном прокате должна иметь место область формирования бейнито–перлитных структур. В дей-

ствительности этого не наблюдается в силу того, что в реальных условиях формирование структуры происходит при понижении температуры проката. Однако результаты исследований превращений аустенита, в том числе в прилегающем к поверхности объеме, в котором после прерывания закалки наблюдается промежуточный перед окончательным замедленным охлаждением на воздухе период быстрого повышения температуры, свидетельствуют о том, что этот период вносит существенные отличия в закономерности формирования структуры в соответствии с теми, которые наблюдаются в околоосевом объеме.

Названные отличия начинают выявляться после преодоления арматурным прокатом при упрочнении значений предела прочности  $\sigma_b=620 \text{ Н/мм}^2$ . При этом в составе феррито–перлитной смеси появляется дополнительная структурная составляющая. Такую составляющую большей частью называют вырожденным или аномальным перлитом. Предполагается, что образование вырожденного перлита происходит благодаря эвтектоидному распаду аустенита. Но в противоположность собственно перлиту, формирование которого происходит путем кооперативного роста пластин феррита и цементита, выделение этих фаз в вырожденном перлите происходит раздельно.

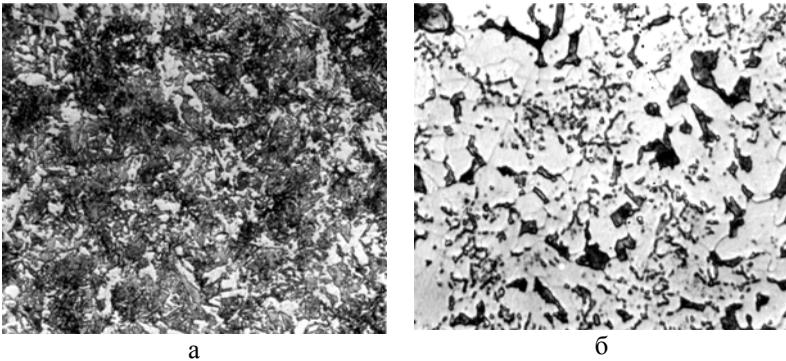


Рис.4.  $\times 500$  – Микроструктура арматурного проката при формировании участков вырожденного перлита в сталях с содержанием углерода: а – 0,32% С; б – 0,17% С.

Появившись в слоях, близких к мартенситу у поверхности, участки вырожденного перлита по мере повышения предела прочности проката постепенно распространяются на все большие удаления от поверхности и при  $\sigma_b \approx 675 \text{ Н/мм}^2$  выявляются в структуре слоев у границы с околоосевой зоной проката. Распространение слоев, содержащих вырожденный перлит, совпадает с выявляемым при исследовании макроструктуры расширяющимся от поверхности стержней светотравящимся слоем (рис.3,а–б).

По мере последующего повышения прочности проката участки вырожденно перлита постепенно вытесняют «рядовые» структуры феррито–перлитной смеси (рис.4,а) и, в конце концов, структура становилась состоящей из одного вырожденно перлита.

Появление при упрочнении сначала отдельных участков вырожденно перлита, а затем и последующее постепенное вытеснение ими феррито–перлитных структур, формирующихся при распаде непрерывно охлаждаемого аустенита, наблюдали при формировании структуры термически упрочняемого арматурного проката из низкоуглеродистых сталей по способу прерванной закалки независимо от содержания в них химических элементов. Но наиболее отчетливо формирование структур с совместным присутствием в них и вырожденно перлита, и феррито–перлитной смеси наблюдалось в сталях при содержаниях углерода, меньших 0,2% (рис.4,б).

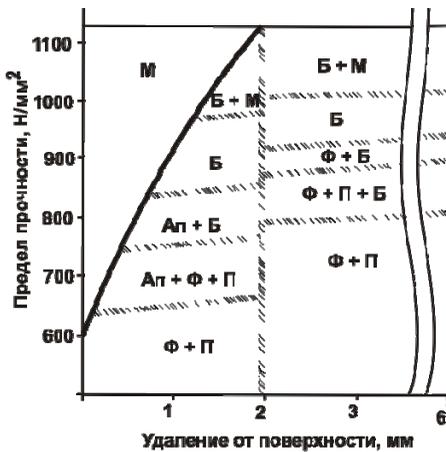


Рис. 5. Диаграмма влияния степени упрочнения на формирование микроструктуры по сечению арматурного проката, термически упрочняемого по способу прерванной закалки.

**Закключение.** Результаты исследования закономерностей влияния степени упрочнения на формирование микроструктуры по сечению арматурного проката, термически упрочняемого по способу прерванной закалки, обобщены в виде структурной диаграммы, приведенной на рис. 5. Настоящая диаграмма все еще остается достаточно схематичной, так как детальное определение распространения слоев с соответствующими структурами выполнены были только для непрерывного мартенситного слоя, формирующегося у поверхности непосредственно в процессе интенсивного охлаждения, и начала распространения слоя со структурами вырожденно перлита, формирующегося при распаде переохлажденного аустенита в процессе замедленного охлаждения стержней на воздухе. Границы распространения областей, в зависимости от степени упрочнения других типов структур, детально не исследовали. В связи с этим границы распространения таких областей на диаграмме показаны штрихов-

кой. Также штриховкой указана граница контакта прилегающего к поверхности слоя, в котором при применении прерванной закалки наблюдается промежуточный период повышения температуры и сердцевинного объема, в котором при тех же условиях термического упрочнения наблюдается только понижение температуры. Применение штриховки для выделения названной границы связано с тем, что в реальном арматурном стержне положение этой границы в целом, как уже подчеркивалось ранее, не может оставаться постоянным.

*Статья рекомендована к печати:  
ответственный редактор  
раздела «Термическая обработка проката»  
докт.техн.наук, проф. И.Г.Узлов*

***О.Г.Сидоренко, І.П.Федорова, А.П.Сухой***

**Дослідження закономірностей формування структури арматурного прокату, термічно зміцнюваного із застосуванням способів перерваного і переривистого гарту в потоці прокатного стану**

Метою роботи є дослідження макро- і мікроструктури арматурного прокату, термічно зміцнюваного за способом перерваного гарту в потоці стану. Встановлено, що в межах зміцнюваного стрижня на відстані в 0,3 – 0,4 його радіусу стабільно виявляється межа переходу від одних закономірностей формування структури по перетину прокату до інших. Показано, що поява при зміцненні окремих ділянок виродженого перлиту, а потім і подальше поступове витіснення ними ферито-перлитових структур, спостерігається незалежно від вмісту в них хімічних елементів.