

Ткаченко Ф.К.<sup>1</sup>, Рябикина М.А.<sup>2</sup>, Ткаченко Н.В.<sup>3</sup>

## Влияние параметров изотермической обработки на структурообразование и свойства стали X70

<sup>1</sup> Ткаченко Фёдор Константинович, доктор технических наук, профессор<sup>2</sup> Рябикина Марина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент<sup>3</sup> Ткаченко Нина Валериевна, аспирант

Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина

**Аннотация:** В широком интервале скоростей охлаждения в стали X70 формируется структура, состоящая из полигонального феррита и игольчатого бейнита. Мартенситное превращение, напротив, занимает узкий интервал скоростей охлаждения и протекает практически мгновенно. Можно предположить, что в связи с высоким положением температур начала и конца мартенситного превращения в стали X70 должны наблюдаться процессы отпуска образовавшихся при охлаждении игольчатых структур. Выполнено исследование влияния температур нагрева и параметров изотермической выдержки в интервале мартенситного превращения на особенности структурообразования и твердость стали X70. С этой целью образцы из стали X70 были нагреты до температур 900-1200 °С и затем подвергнуты изотермической выдержке в соли при температурах 300-450 °С в течение 1, 5 и 10 минут. Результаты исследования показали, что размер аустенитного зерна зависит от температуры нагрева; рост зерна в стали X70 с содержанием Ti (0.02 вес.%), Nb (0.06 вес.%) и V (0.05 вес.%) наблюдается уже при 1100 °С. Снижение температуры закалки от 1200 до 900 °С вызывает увеличение твердости образцов вследствие образования структуры мартенсит + карбиды. Детальные исследования микроструктуры образцов показали, что с увеличением разности (температура нагрева – температура изотермической выдержки) и скорости охлаждения в стали X70 возможно образование следующих типов структур: (перлит + полигональный феррит) → (феррит + зернистый бейнит) → (феррит + игольчатый бейнит) → игольчатый мартенсит. Чем выше температура изотермической выдержки, тем интенсивнее протекает диффузия, которая ускоряет распад образовавшейся при охлаждении бейнито-мартенситной структуры, что, в свою очередь, вызывает монотонное снижение твердости стали X70. Увеличение времени изотермической выдержки также вызывает снижение твердости.

Ключевые слова: мартенситное превращение, бейнит, изотермическая выдержка, самоотпуск, структурообразование.

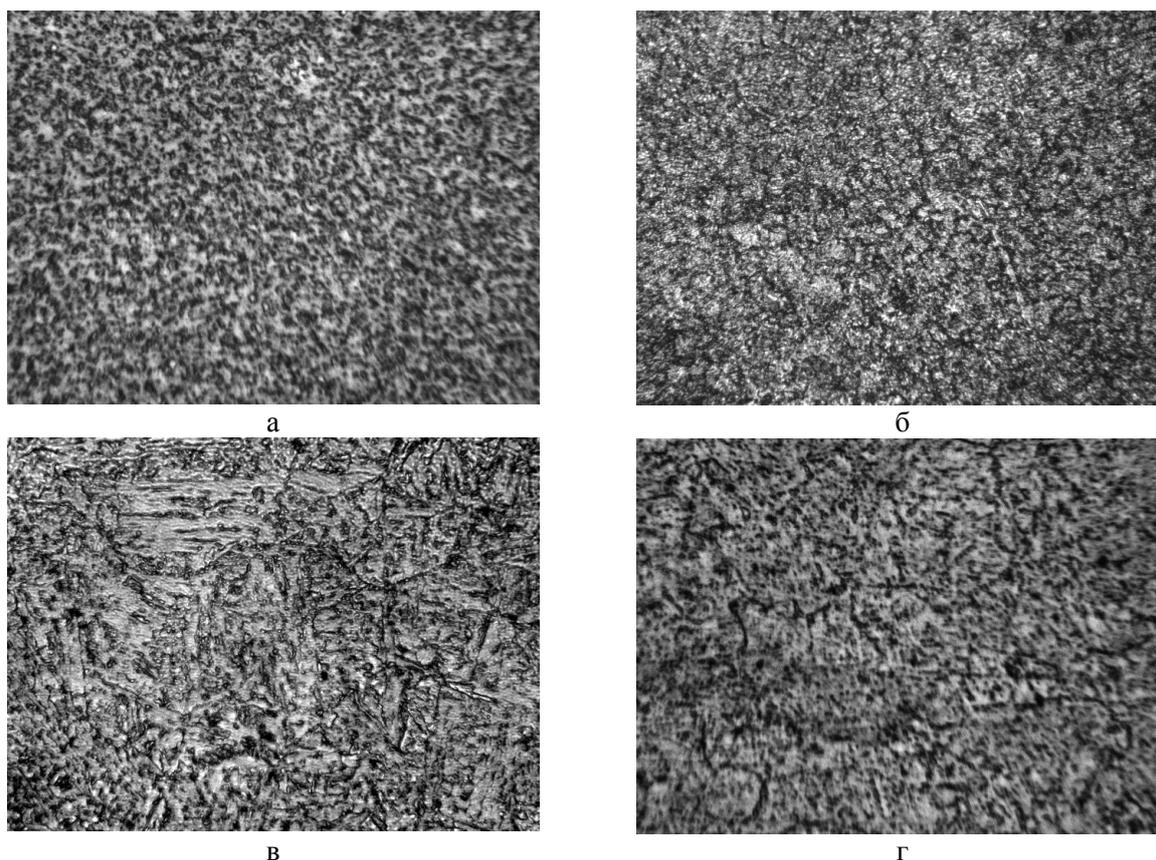
Как известно [1], значения температур начала и конца мартенситного превращения, а также ход мартенситной кривой определяются главным образом химическим составом аустенита. Для малоуглеродистых сталей точки  $M_n$  и  $M_k$  лежат значительно выше комнатной температуры, и остаточный аустенит практически не обнаруживается. Особенностью стали X70 является то, что в широком интервале скоростей охлаждения от ~300 до ~0,2 °С/с в стали X70 формируется структура, состоящая из полигонального феррита и игольчатого бейнита [2]. Мартенситное превращение, напротив, занимает узкий интервал скоростей охлаждения и протекает практически мгновенно. Можно предположить, что в связи с высоким положением интервала мартенситного превращения в сталях типа X70 должны наблюдаться процессы самоотпуска образовавшихся при охлаждении игольчатых структур. Исследование особенностей формирования таких структур представляет значительный научный и практический интерес.

В данной работе проведен лабораторный эксперимент по изучению структурного состояния стали X70 после нагрева до температур 900 – 1200 °С ( $\tau=10$  минут) и последующей изотермической выдержки при 350 - 450 °С в течении 1, 5 и 10 минут. Размеры образцов составляли 10×10×3 мм. Термическую обработку проводили

в печи SNOL 288/1200 (нагрев под аустенитизацию), изотермическую выдержку – в лабораторной соляной ванне. Для металлографического анализа микроструктуры применяли инвертированный металлографический микроскоп «Neophot-21» с приставкой Kappa Image Base.

Как видно из рисунка 1 а, аустенитизация при 900 °С и последующая изотермическая выдержка при  $t_{\text{ступени}}=300-450$  °С привели к образованию смешанной мелкодисперсной структуры, состоящей из феррита (Ф) и глобулярного бейнита (ГБ)/отпущенного мартенсита (ОМ). Уменьшение температуры и продолжительности изотермической выдержки практически не влияет на структуру стали X70, но при увеличении длительности выдержки до 10 минут наблюдается незначительное «размытие» четкости структурных составляющих. Возможно, это связано с более полным прохождением процессов отпуска.

При  $t_{\text{нагрева}}=1000$  °С и  $t_{\text{ступени}}=300-450$  °С в структуре стали X70 появляются участки игольчатого (речного) бейнита (ИБ или РБ) небольших размеров, (рисунок 1 б), наблюдается уменьшение количества избыточного феррита. Установлено [3,4], что небольшие участки игольчатого бейнита располагаются совместно с вырожденным перлитом и состоят из нескольких коротких параллельных реек  $\alpha$ -фазы шириной до 2-3 мкм.



**Рис. 1.** Микроструктура стали X70 после нагрева до 900-1200 °С и последующей изотермической выдержки при 300°С в течении 5 мин

При повышении температуры нагрева до 1100 – 1200 °С наблюдается укрупнение аустенитного зерна и уменьшение количества карбидной фазы вследствие растворения частиц карбидов/карбонитридов в аустените. После изотермической выдержки при  $t_{\text{ступени}}=300-450^{\circ}\text{C}$  количество феррита в структуре стали X70 резко уменьшается, и преобладающей становится бейнитная структура игольчатой морфологии (рисунок 1 в, г).

Уменьшение температуры изотермической выдержки от 450 до 300 °С практически не вносит изменений в морфологию образующихся структур. Однако известно, что снижение температуры бейнитного превращения сопровождается меньшим обеднением  $\alpha$ -твердого раствора углеродом. Изотермическая выдержка при  $t_{\text{ступени}}=450^{\circ}\text{C}$  и  $\tau=10$  минут приводит к появлению небольших темных участков внутри и по границам светлой мартенситоподобной структуры. Появление этих темных островков связано, по видимому, с развитием процессов отпуска, выделением дисперсных частиц карбидов из рек  $\alpha$ -фазы.

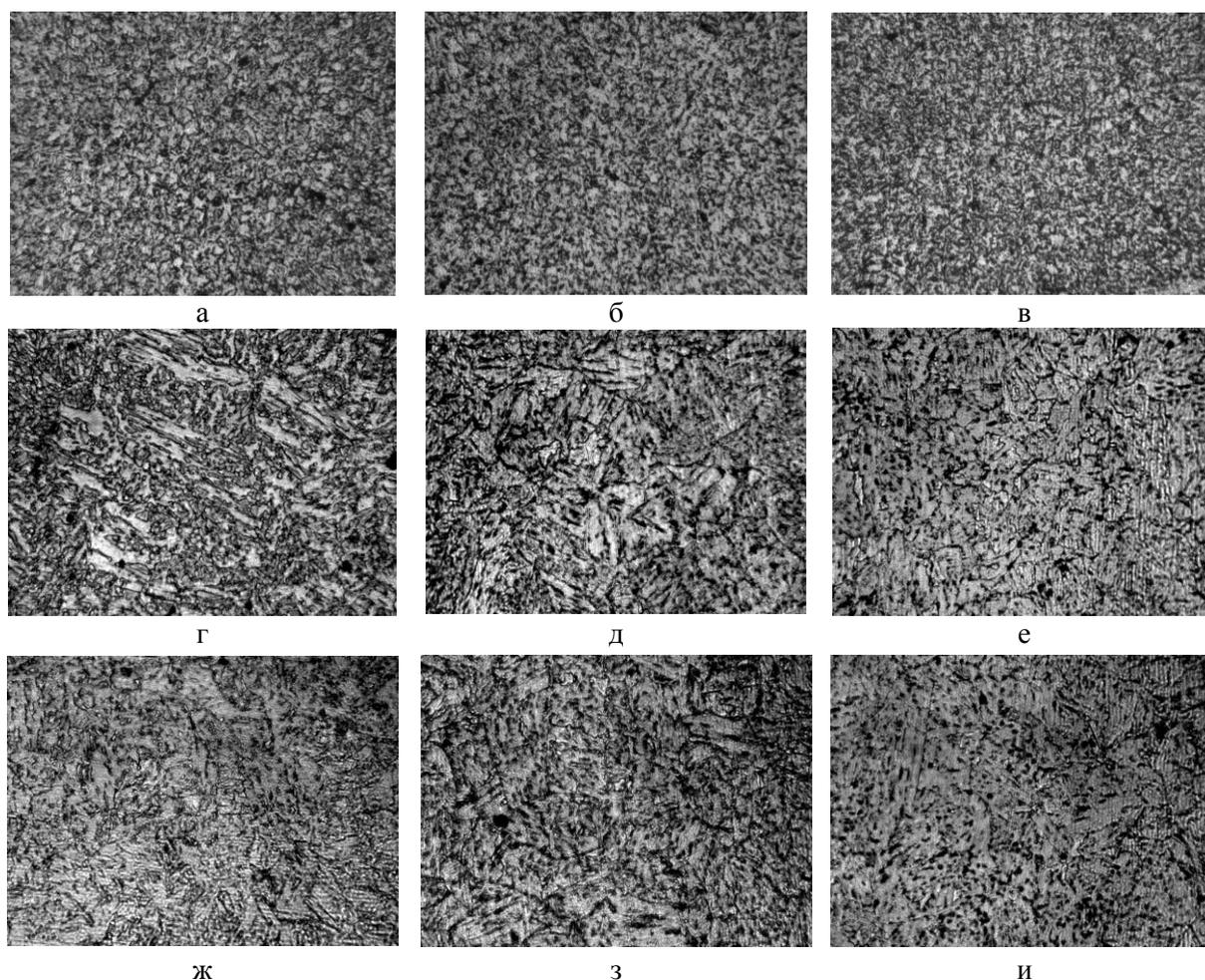
Структуры, полученные при изотермической выдержке от  $t_{\text{нагрева}}=1200^{\circ}\text{C}$ , соответствуют максимальному перепаду температур (например,

при  $t_{\text{нагрева}}=900^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\text{ступени}}=300^{\circ}\text{C}$  температурный градиент составляет  $600^{\circ}\text{C}$ ; при  $t_{\text{нагрева}}=1200^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\text{ступени}}=300^{\circ}\text{C}$  -  $900^{\circ}\text{C}$ ), для них характерно выраженное реечное строение (рисунок 2). Как и в предыдущем случае на границах и в объеме кристаллов бейнитной (мартенситной)  $\alpha$ -фазы присутствуют дисперсные частицы карбидов VC и NbC. С уменьшением  $t_{\text{ступени}}$  от 450 до  $300^{\circ}\text{C}$  бейнитное превращение реализуется при более низких температурах, что приводит к уменьшению ширины рек и росту в рейках плотности дислокаций.

Таким образом, с увеличением разности температур ( $t_{\text{нагрева}} - t_{\text{ступени}}$ ) и скорости охлаждения в стали X70 возможно образование следующих типов структур:  $(\text{Ф}+\text{П}) \rightarrow (\text{Ф}+\text{ГБ}) \rightarrow (\text{Ф}+\text{РБ}$  или  $\text{ИБ}) \rightarrow \text{РМ}$ .

Влияние температуры и продолжительности изотермической выдержки на твердость образцов из стали X70 представлено на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3 а, при  $t_{\text{нагрева}}=900^{\circ}\text{C}$  с повышением температуры ступени от 300 до  $450^{\circ}\text{C}$  наблюдается монотонное уменьшение твердости от 205 НВ до 185 НВ. При  $t_{\text{ступени}}=300-400^{\circ}\text{C}$  длительность изотермической выдержки не оказывает существенного влияния на твердость.



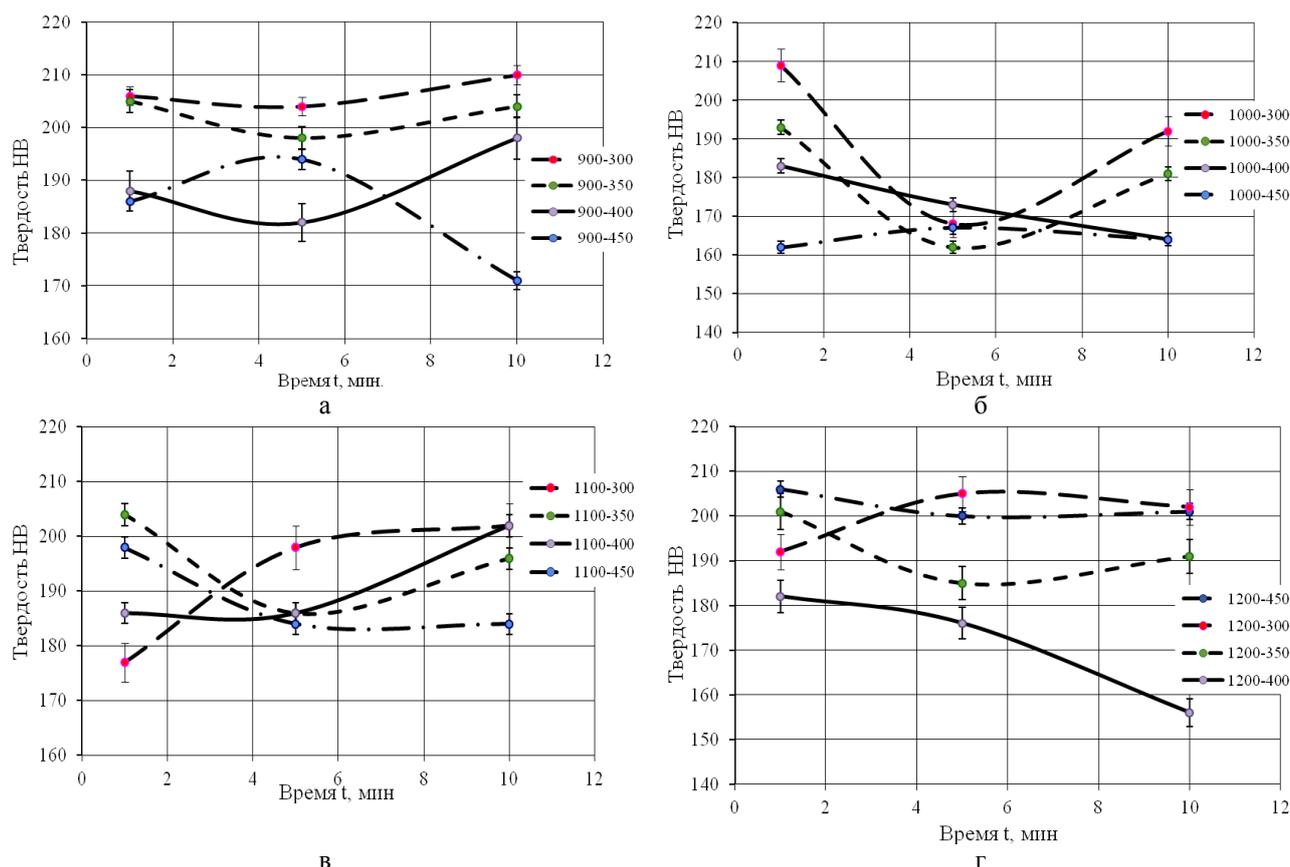
**Рис. 2.** Микроструктура стали X70 после нагрева до 1000-1200 °С и последующей изотермической выдержки при 450 °С в течение 1, 5 и 10 мин: а, б, в – 1000 °С; г, д, е – 1100 °С; ж, з, и – 1200 °С

Однако при температуре ступени 450 °С ход кривой изменился и при 10 минутной выдержке наблюдается заметное падение твердости до 167 НВ, что по-видимому обусловлено распадом мартенсита, коагуляцией и коалесценцией карбидов и карбонитридов.

Зависимость твердости стали X70 от параметров ступени при охлаждении от 1000°С характеризуется заметным разбросом значений (рисунок 3 б). Уменьшение температуры изотермической выдержки от 450 до 300 °С при  $\tau=1$  мин вызвало уменьшение твердости от 210 до 160 НВ. При температурах ступени 300 – 350 °С кривые твердости проходят через минимум при  $\tau=5$  мин. При 400 – 450 °С отмечается некоторое понижение значений твердости, связанное с увеличением времени выдержки. На рисунке 3, в для  $t_{\text{нагрева}}=1100$  °С кривые твердости для всех вариантов изотермической выдержки близки между собой и проходят через незначительный минимум, исключение составляет температура ступени 300 °С, при которой наблюдается монотонное возрастание твердости с увеличением длительности выдержки. Это, по-видимому, обусловлено связыванием углерода в карбиды и до-

полнительным выделением карбидной фазы. Следует иметь в виду также протекание процессов рекристаллизации феррита, увеличение плотности дислокаций.

При  $t_{\text{нагрева}}=1200$  °С исходной структурой перед ступенчатым охлаждением является однородный  $\gamma$ -твердый раствор, количество карбидов/карбонитридов минимально и примерно соответствует их количеству при температуре начала черновой прокатки. Поскольку почти все карбиды переведены в твердый раствор, устойчивость аустенита высокая, и при последующем охлаждении он распадается с образованием дисперсных продуктов речной морфологии. При кратковременной выдержке уровень твердости достаточно высок ~180 - 210 НВ (рисунок 3 г) и с увеличением  $\tau$  до 10 минут проявляет тенденцию к снижению. Незначительное повышение твердости с увеличением длительности выдержки от 1 до 10 минут при  $t_{\text{ступени}}=300$  °С возможно связано с изменениями субструктуры стали. При таких высоких температурах нагрева сильнее проявляется влияние скорости охлаждения из-за более существенных перепадов температур.



**Рис. 3.** Влияние температуры и продолжительности изотермической выдержки на твердость стали X70: а – аустенитизация при 900 °С; б – аустенитизация при 1000 °С; в – аустенитизация при 1100 °С и г – 1200 °С

### Заключение.

Таким образом, в настоящей работе на основе лабораторного эксперимента исследовано влияние температуры нагрева и параметров изотермической выдержки в мартенситном интервале на особенности структурообразования и твердость стали X70. С увеличением разности температур ( $t_{\text{нагрева}} - t_{\text{ступени}}$ ) и, как следствие, скорости охлаждения в возможно образование следующих типов структур:  $(\Phi + \Pi) \rightarrow (\Phi + \Gamma\text{Б}) \rightarrow (\Phi + \text{РБ или ИБ}) \rightarrow \text{РМ}$ . Чем выше температура изотермической выдержки ( $t_{\text{ступени}}$ ), тем интенсивнее протекает диффузия, которая ускоряет распад исход-

ного аустенита и образовавшегося при охлаждении мартенсита. Увеличение продолжительности выдержки от 1 до 10 минут при  $t_{\text{ступени}} = 300 - 450$  °С увеличивает количество продуктов распада мартенсита. При  $t_{\text{ступени}} = 300$  °С распад мартенсита замедляется вследствие уменьшения коэффициента диффузии, поэтому твердость стали X70 сохраняется максимальной. Увеличение температуры и продолжительности изотермической выдержки вызывает снижение твердости стали X70.

### Литература

1. Спиваков В.И. Исследование кинетики превращения аустенита и формирования бейнитной структуры при деформационно-термическом упрочнении листов из малоперлитной стали X70 (X65) для труб газопроводов / В.И. Спиваков, Э.А. Орлов, П.Л. Литвиненко, А.В. Ноговицын // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – №1. – С. 74-77.
2. H.G. Hillendrand, M. Graf, Ch. Kalwa. Development and production of higy strength pipelines steel, Noibium 2001, Orlando, USA, 2001.
3. Пышминцев И.Ю. Влияние скорости охлаждения на структуру и свойства низкоуглеродистой трубной стали / И.Ю. Пышминцев, А.Н. Борякова, М.А. Смирнов // *Металлург*. – №8. 2008. – С.48-51.
4. Судариков М.В. Структура игольчатого бейнита в низкоуглеродистой трубной стали / М.В. Судариков, О.В. Самойлова, М.А. Смирнов, А.Н. Мальцева, Э.Н. Михайлова // *Сборник тезисов XXIV Российской конференции по электронной микроскопии*. – 2012. – С.135.

**Tkachenko F.K., Ryabikina M.A., Tkachenko N.V.**

**The influence of parameters of isothermal treatment on structure and properties of steel X70**

**Abstract:** At different cooling rates of the steel X70 a typical structure is formed. This structure consists of the polygonal ferrite and acicular bainite. Martensitic transformation, in contrast, occupies a narrow range of cooling rates and runs almost instantly. It can be assumed that because of the high values of the  $M_s$  and  $M_f$  temperatures in the steel tempering processes of the acicular structure (formed upon cooling) should be observed. We have investigated the effect of different heating temperatures and parameters of isothermal holding at temperatures of martensitic transformation on the characteristics of the resulting structures and hardness of steel X70. For this purpose samples of X70 steel were heated to temperatures of 900-1200 °C and then put under isothermal holding in the salt at 300-450 °C temperatures for 1, 5 and 10 minutes. The results showed that the coarsening of austenite grain structure is influenced by the heating temperature, the grain growth in steel X70 with Ti (0.02 wt-%), Nb (0.06 wt-%) and V(0.05 wt-%) was already observed at 1100 °C. Decreasing the quenching temperature increased the hardness of specimens due to production of martensite + carbides structure. Detailed microstructural examinations found out that with increasing difference between heating temperature and the temperature of isothermal holding and the cooling rate of the steel X70 following types of structures can be formed: (pearlite + polygonal ferrite) → (ferrite + granular bainite) → (ferrite + acicular bainite) → acicular martensite. By increasing the holding temperature of 300 to 450 °C the diffusion processes and decomposition of bainite - martensite structure (formed during cooling) are accelerated. This leads to a monotonic decrease in hardness steel X70. Analogically the increasing isothermal holding time also causes a decrease in hardness.

**Keywords:** martensitic transformation, bainite, isothermal holding, autotempering, structure formation.