

## ДИАГРАММА РАСПАДА ПЕРЕОХЛАЖДЁННОГО АУСТЕНИТА ПРИ СОРБИТИЗАЦИИ В ГРАФИТЕ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ТОНКОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

Алимов В. И., Пушкина О. В., Пономарёва И. В.

Изучена кинетика распада аустенита деформированной высокоуглеродистой стали при охлаждении из аустенитной области в среде порошкообразного графита и на основе полученных данных построены деформационно-временные диаграммы распада аустенита предварительно холоднодеформированной стали. Материалом служила проволоочная заготовка для производства тонкой высокопрочной проволоки из стали с 0,83 % С, подвергнутая предварительной холодной пластической деформации (ПХПД) со степенями обжатия 0–75 %. Полученные диаграммы могут быть использованы в теории и технологии термической обработки при разработке новых и оптимизации существующих режимов производства изделий из ПХПД-материалов, в частности в сталепроволочном производстве при изготовлении высокопрочной проволоки.

Вивчена кінетика розпаду аустеніту деформованої високовуглецевої сталі при охолодженні з аустенітної області в середовищі порошкоподібного графіту і на основі отриманих даних побудовані деформаційно-часові діаграми розпаду аустеніту попередньо холоднодеформованої сталі. Матеріалом служила дротяна заготовка для виробництва тонкого високоміцного дроту зі сталі з 0,83 % С, піддана попередній холодній пластичній деформації (ПХПД) зі ступенями обтиску 0–75 %. Отримані діаграми можуть бути використані в теорії і технології термічної обробки при розробці нових та оптимізації існуючих режимів виробництва виробів з ПХПД-матеріалів, зокрема в сталедротовому виробництві при виготовленні високоміцного дроту.

Studied the austenite decomposition kinetics of deformed high carbon steel during cooling from the austenite region in the medium of powdered graphite on the basis of the data built strain-time diagrams of the pre- cold- steel austenite decomposition. The material was a wire bar for production of high-strength thin steel wire with 0,83 % C, subjected to preliminary cold plastic deformation (PCPD) at a reduction ratio 0–75 %. Diagrams can be used in the theory and technology of thermal processing in the development of new modes and optimizing existing articles of manufacture PCPD-materials, particularly in the steel wire manufacture for high-strength wire.

Алимов В. И.

д-р техн. наук, проф. ДонНТУ

Пушкина О. В.

аспирант ДонНТУ

[ksanaol@mail.ru](mailto:ksanaol@mail.ru)

Пономарева И. В.

магистр ДонНТУ

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

УДК 621.778

Алимов В. И., Пушкина О. В., Пономарёва И. В.

### ДИАГРАММА РАСПАДА ПЕРЕОХЛАЖДЁННОГО АУСТЕНИТА ПРИ СОРБИТИЗАЦИИ В ГРАФИТЕ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ТОНКОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

Тонкая высокопрочная стальная проволока является незаменимым материалом для металлокорда, тросов, специфического режущего инструмента, средств противоударной защиты и т. д.

Совокупность знаний о фазово-структурных превращениях в металлах и сплавах базируется на их термодинамике, механизме и кинетике. Кинетику фазово-структурных превращений характеризуют параметры, кинетические кривые и диаграммы, значимыми из которых длительное время являются 4 основных типа – диаграммы изотермического образования новых фаз и структур (при нагреве) и термокинетические диаграммы образования, диаграммы изотермического распада исходных высокотемпературных фаз и структур (при охлаждении) и термокинетические диаграммы распада. При изучении кинетики фазово-структурных превращений в предварительно деформированных сплавах целесообразным является использование деформационно-температуро-временных зависимостей, близких по своей сути к диаграммам рекристаллизации.

Кинетические характеристики связаны с технологическими средами, в которых протекают фазово-структурные превращения, основными из которых для проволочной заготовки, предназначенной для производства высокопрочной стальной проволоки, длительный период служат расплавы металлов и солей [1, 2] с недостатками экономического, экологического и технологического содержания. Однако работы и исследования последних десятилетий привели к накоплению большого количества экспериментального материала по бессолевой сорбитизации проволочной заготовки путем охлаждения на спокойном [3–5] и движущемся воздухе [6–8]; дальнейшие исследования подтверждают возможность использования порошкообразных сред для сорбитизации, в частности графитовых, в качестве экологически и экономически выгодных [9–14]; имеется основание для использования и других дискретных охлаждающих сред [15–16].

Целью настоящей работы является изучение кинетики распада аустенита деформированной высокоуглеродистой стали при охлаждении из аустенитной области в среде порошкообразного графита и построение на основе полученных данных деформационно-временных диаграмм распада аустенита предварительно холоднодеформированной стали.

Для исследований использовали проволочную заготовку для производства тонкой высокопрочной проволоки из стали с 0,83 % С, подвергнутую предварительной холодной пластической деформации (ПХПД) с различными степенями обжатия вплоть до 75 %.

Образцы нагревали до температуры  $900 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдерживали 10 мин и по одному переносили в тигель с серебристым порошкообразным графитом, температура которого составляла 20 и  $200^\circ\text{C}$ , а длительность выдержки в нем 0–12 с; после этого образцы резко охлаждали в воде.

Шлифы изготавливали по стандартной методике с последующим их травлением в 4 %-ом спиртовом растворе азотной кислоты. Микроструктуру продольного и поперечного сечения образцов изучали на микроскопе МИМ-7 с последующим фотографированием; многократное измерение микротвёрдости проводили на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 1 Н.

По микроструктурам исследуемых образцов оценивали долю превращённого аустенита по методу секущих (ГОСТ 5639) и строили кинетические кривые превращения переохлаждённого аустенита в продукты распада.

Для оценки возможной разницы в температуре центра и поверхности образцов определяли критерий Био [17], расчетное значение которого составило 0,026, что меньше 0,25 [18] и дает основание считать образцы Ø2 мм при данных параметрах охлаждения термически тонкими телами, для которых разница в температурах поверхности и центра минимальна и не критична [17].

Для диагностики получаемых при распаде продуктов использовали диаграммы изотермического превращения близких по химсоставу сталей [19], а также ранее полученную зависимость [3]:

$$H_{\mu} = 4149 - 5800 \times C - 4,33 \times \varepsilon + 4234 \times C^2 + 13,1 \times C \times \varepsilon + 0,048 \times \varepsilon, \quad (1)$$

где  $C$  – содержание углерода, % (масс.);

$\varepsilon$  – степень ПХПД, %.

Твердость сорбитных структур составляет [19] примерно 28–33 HRC (2500–3000 Н/мм<sup>2</sup>), трооститных от 34 до 37 HRC (3100–3500 Н/мм<sup>2</sup>), грубопластинчатого перлита – менее 28 HRC (менее 2500 Н/мм<sup>2</sup>).

Рассчитанная по зависимости (1) микротвердость для исследуемой стали приведена в табл. 1.

Таблица 1

Рассчитанные по (1) значения микротвёрдости в зависимости от степени деформации

Степень ПХПД, %	0	27	47	61	69	75
Микротвердость, Н/мм <sup>2</sup>	2218 ± 111	2419 ± 121	2613 ± 131	2772 ± 139	2871 ± 144	2950 ± 147

Микроструктуры продольного сечения образцов с различными степенями деформации после нагрева на 900 °С и последующей выдержки в порошкообразном графите комнатной температуры с выдержкой до 10 с представлены на рис. 1.

Видно, что при выдержке в течение 1 с структура состоит из мартенсита, следовательно, распад ещё не начался; при выдержке 5 с структура частично состоит из мартенсита и продуктов распада, т. е. происходит частичный распад аустенита, а после 10 с – полностью из продуктов распада, что свидетельствует о полном завершении процесса распада переохлаждённого аустенита.

Зависимости микротвёрдости структурных составляющих образцов с разными степенями ПХПД от времени выдержки в графите при разных температурах представлены на рис. 2.

На графиках (рис. 2) верхняя кривая соответствует микротвёрдости мартенсита, нижняя – микротвёрдости продуктов распада; в интервале, где обе кривые перекрываются – часть структурных составляющих имеет микротвёрдость, соответствующую мартенситной, а часть колеблется в интервале 2000–4300 Н/мм<sup>2</sup>, что соответствует микротвёрдости продуктов перлитного превращения (см. табл. 1 и [17]). На этом временном участке происходит распад переохлаждённого аустенита.

На основании экспериментальных кинетических кривых превращения аустенита в перлитные структуры при неизотермическом охлаждении образцов в порошкообразном графите с разной температурой (см. [17]) строили диаграммы распада аустенита в координатах длительность распада – степень ПХПД (рис. 3,) и определяли кинетические характеристики распада (рис. 4).

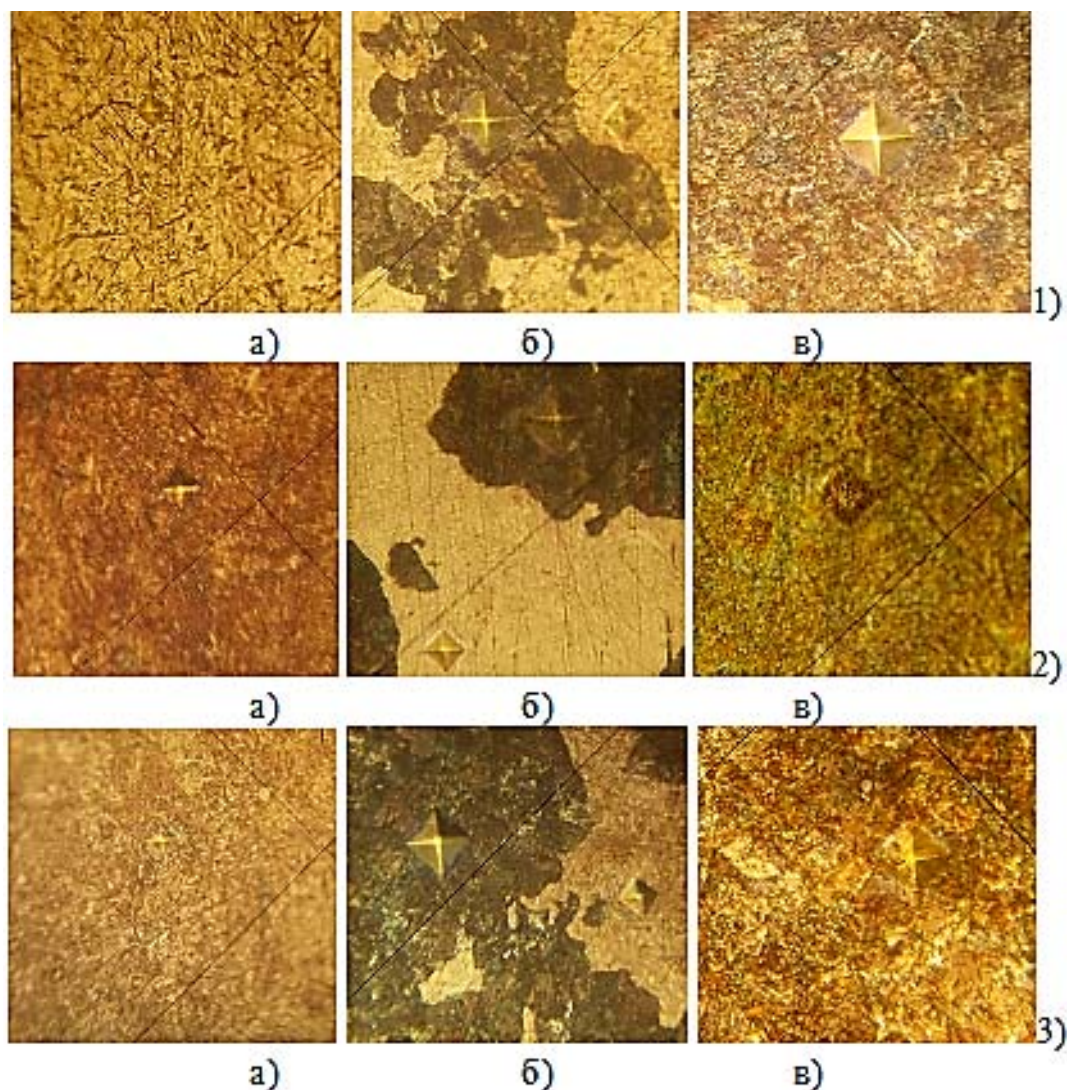


Рис. 1. Микроструктуры продольного сечения деформированных на 0 % (1), 47 % (2) и 75 % (3) образцов после нагрева на 900 °С и последующей выдержки в графите комнатной температуры:

а) 1 с; б) 5 с; в) 10 с,  $\times 476$

Из полученной деформационно-временной диаграммы (рис. 3) видно, что нелинейный ход кривых устойчивости и длительный распад переохлажденного аустенита свидетельствует о различных факторах, влияющих на распад, в зависимости от степени ПХПД. При небольших степенях ПХПД (15–35 %) с увеличением обжатия длительность распада переохлажденного аустенита уменьшается, что связано с унаследованными аустенитом дефектами холоднодеформированной стали [1, 20], которые способствуют образованию большого количества центров зарождения перлитных колоний; кроме этого, увеличению скорости распада способствует накопленная материалом во время предварительной деформации энергия, повышающая его термодинамическую неустойчивость.

Замедление кинетики распада образцов с дальнейшим ростом ПХПД до 50 % можно связать с накоплением критического количества дефектов в структуре, которые тормозят рост зародившихся на начальных стадиях перлитных колоний. При предшествующей деформации с небольшими степенями количество внесенных дефектов, передавшихся аустенитной структуре, достаточно для увеличения центров зарождения перлитных колоний и при этом не является барьером для их последующего роста, что и приводит к интенсификации кинетики превращения.

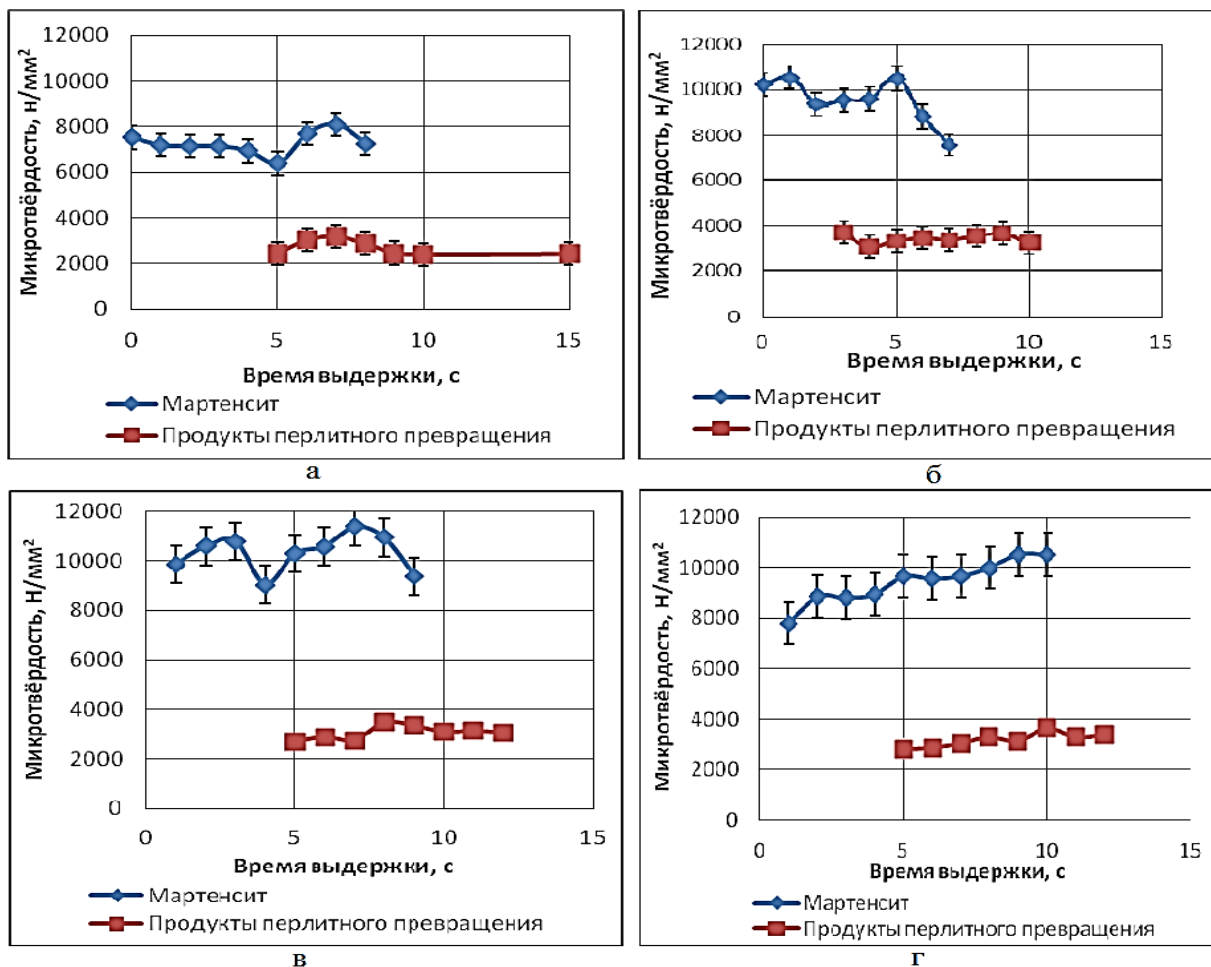


Рис. 2. Зависимость микротвёрдости структурных составляющих образцов от времени выдержки в графите, его температуры ( $T_{ep}$ , °C) и степени ПХПД ( $\epsilon$ , %):

а)  $\epsilon = 0, T_{ep} = 20$ ; б)  $\epsilon = 75, T_{ep} = 20$ ; в)  $\epsilon = 0, T_{ep} = 200$ ; д)  $\epsilon = 75, T_{ep} = 200$

Температура нагрева	Удельное время нагрева	Температура графита
$900 \pm 10^\circ\text{C}$	300 с/мм	$20^\circ\text{C}$

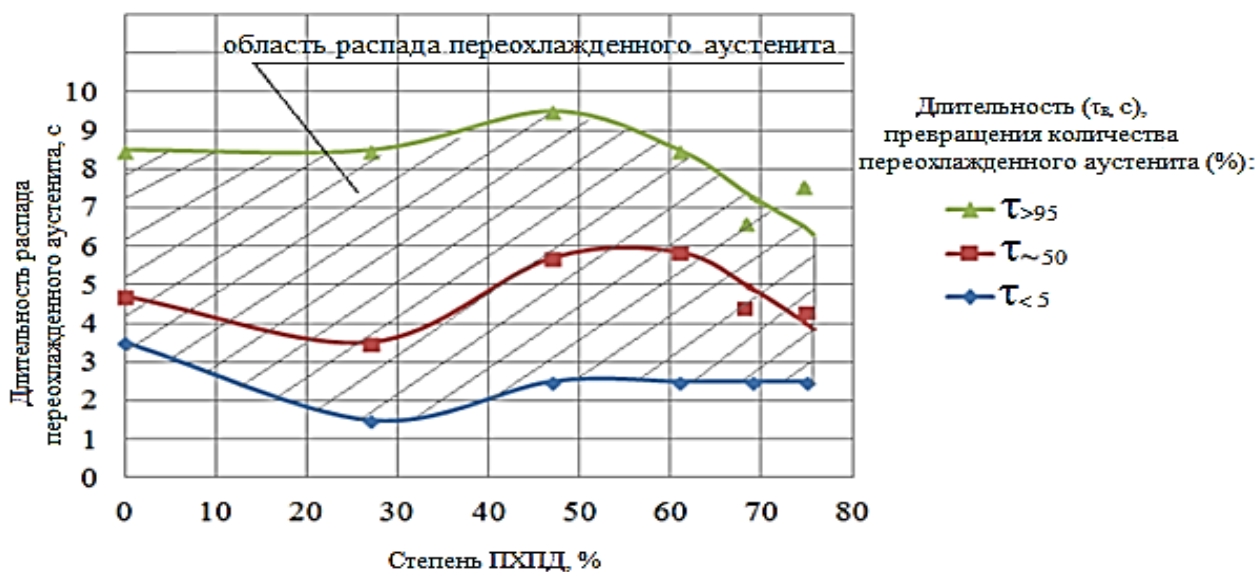


Рис. 3. Диаграмма распада переохлажденного аустенита в предварительно холодно-деформированной эвтектидной стали при охлаждении в среде сыпучего графита



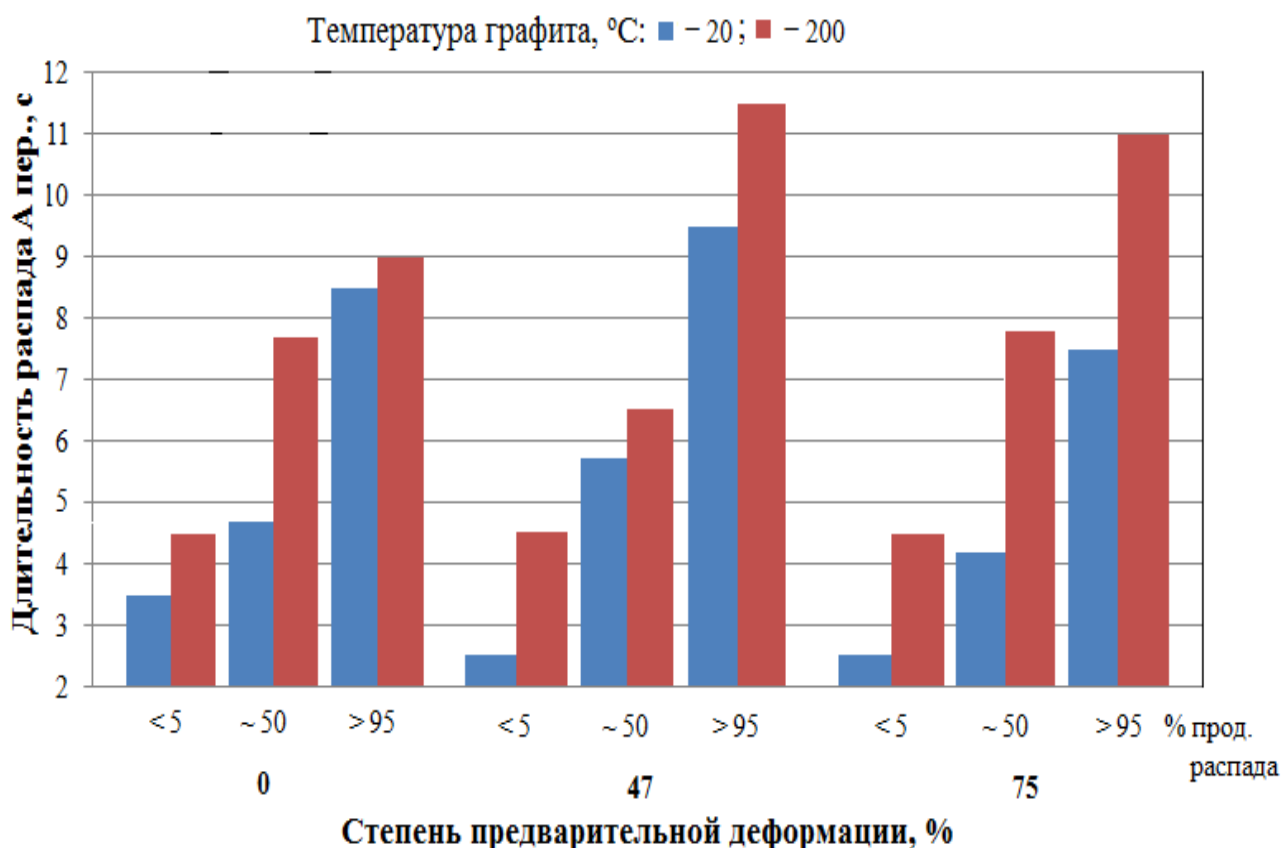


Рис. 4. Кинетические характеристики распада переохлажденного аустенита в предварительно холоднодеформированной эвтектоидной стали в зависимости от температуры охлаждающей среды сыпучего графита

При деформации с большими степенями обжатия вплоть до 70–75 %, по-видимому, начинает играть роль уровень накопленных напряжений, вызванных предварительной деформацией, что приводит к некоторому возрастанию скорости распада.

Повышение температуры порошкообразного графита как охлаждающей среды (рис. 4) до 200 °С приводит к некоторой стабилизации переохлажденного аустенита и увеличению времени его распада на перлитные структуры, хотя в целом закономерности хода кривых сохраняются.

## ВЫВОДЫ

На основании полученных ранее кинетических кривых превращения переохлажденного аустенита в перлитные структуры построена диаграмма распада переохлажденного аустенита нового типа для ПХПД эвтектоидной стали в неизотермически охлаждающей среде сыпучего графита.

Деформационно-временные диаграммы могут быть использованы в теории и технологии термической обработки при разработке новых и оптимизации существующих режимов производства изделий из ПХПД-материалов, в частности в сталепроволочном производстве при изготовлении высокопрочной проволоки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большаков В. И. Оборудование термических цехов, технологии термической и комбинированной обработки металлопродукции / В. И. Большаков, И. Е. Долженков, А. В. Зайцев. – Днепропетровск : «РИА Днепр – VAL», 2010. – 619 с.
2. Алимов В. И. Фазовые и структурные превращения при деформационно-термической обработке стальной проволоки : монография / В. И. Алимов, О. В. Пушкина. – Донецк : Донбасс, 2012. – 242 с.
3. Алимов В. И. Бессолевая сорбитизация проволоки / В. И. Алимов // *Металлургия* : сб. науч. тр. ДонНТУ, 1999. – С. 129–138.
4. Алимов В. И. Закономерности распада переохлажденного аустенита в стальной проволоке при воздушном охлаждении / В. И. Алимов // *Наукові праці ДонНТУ*. – 2008. – № 10 (141). – С. 256–264. – (Серія «Металургія»).
5. Алимов В. И. Свойства проволоки после воздушной сорбитизации заготовки с переохлаждением / В. И. Алимов // *Прогресивні технології у металургії сталі XXI сторіччя : труды 3-ї Міжнародної технічної конференції, 30 жовт. – 02 лист. 2006 р. – Донецьк, 2007. – С. 370–372.*
6. Алимов В. И. Влияние режима термообработки на структуру и свойства предварительно ускоренно охлажденной с прокатного нагрева катанки / В. И. Алимов, О. В. Олейникова (Пушкина), Т. С. Коржова // *Металлургия* : сб. науч. тр. ДонНТУ. – 2011. – Вып. 13 (194). – С. 170–179.
7. Алимов В. И. Упрочнение стальных изделий потоком движущегося воздуха / В. И. Алимов, О. В. Олейникова (Пушкина), Т. Е. Багликова // *Металлургия* : сб. науч. тр. ДонНТУ. – 2011. – Вып. 13 (194). – С. 157–162.
8. Alimov V. I Analysis of rod sorbitizing possibility from individual warming by moving air / V. I. Alimov, O. V. Olejnikova (Pushkina), T. S. Korgova // VII Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании» : материалы конф. – Варна, Болгария, 2011. – Т. 2. – С. 8–12.
9. Пат. на кор. модель Укр. № 65131, МПК С21Д9/52 (2006.01). Спосіб сорбітизації дrottяної заготовки для музичних струн в сипучому графіті / Алімов В. І., Туков В. А., Алімова С. В., Максаков А. І., Олейнікова (Пушкіна) О. В., Пономарьова І. В. – № и 2011 06109 ; заявл. 16.05.2011 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.
10. Заблоцкий В. К. Особенности охлаждения стали 70Х5ВМФ с температуры аустенитизации в сыпучем графите / В. К. Заблоцкий, В. И. Шимко, А. И. Шимко // *Вост.-европ. журн. передовых технологий*. – 2012. – № 1/1 (55). – С. 34–37.
11. Заблоцкий В. К. Термическая обработка стали 80Х3СВФ с применением охлаждения в сыпучем графите / В. К. Заблоцкий, В. И. Шимко, А. И. Шимко // *Вост.-европ. журн. передовых технологий*. – 2012. – № 4/5 (58). – С. 14–17.
12. Пушкина О. В. Перспективні безсолеві середовища для сорбітизації високоміцного дроту / О. В. Пушкина // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2012. – № 3/1 (5). – С. 17–18.
13. Пушкина О. В. Сорбитизация высокопрочной проволоки в экологически предпочтительных сыпучих неметаллических средах / О. В. Пушкина, И. В. Пономарева, В. И. Алимов // *Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів : збірка доповідей XXIII Всеукраїнської наукової конференції*. – Донецьк, ДонНТУ, 2013. – Т. 1. – С. 112–113.
14. Пушкина О. В. Кинетика распада аустенита в деформированной эвтектоидной стали / О. В. Пушкина, И. В. Пономарева // XIV Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых – металлургов : сб. науч. тр. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – С. 30–32.
15. Пат. на кор. модель Укр. № 77019, МПК С21Д9/52. Застосування металевого дроту як середовища для сорбітизації дrottяної заготовки для високоміцного дроту / Алімов В. І., Максаков А. І., Алімова С. В., Туков В. А., Пушкіна О. В., Георгіаду М. В., Жук О. М., Паришкова В. А. – № и 201208467 ; заявл. 09.07.2012 ; опубл. 25.01.2013, Бюл. № 2.
16. Parshikova V. A. Structure and properties of reinforcing wire medium carbon steel / V. A. Parshikova // XIV Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых – металлургов : сб. науч. тр. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – С. 36–38.
17. Цветков Ф. Ф. Теплообмен / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – М. : МЭИ, 2011. – 592 с.
18. Алимов В. И. Кинетика распада переохлажденного аустенита предварительно холоднодеформированной стали при неизотермическом охлаждении в сыпучем графите / В. И. Алимов, О. В. Пушкина, И. В. Пономарева // *Металлургия* : сб. науч. тр. ДонНТУ. – 2013. – Вып. 15 (196) (в печати).
19. Попова Л. Е. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана : Справочник термиста / Л. Е. Попова, А. А. Попов. – 3-е изд., перер. и доп. – М. : Металлургия, 1991. – 503 с.
20. Дьяченко С. С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / С. С. Дьяченко – М. : Металлургия, 1982. – 128 с.