



The working of patenting-brassing unit No 6 StPTs-2 is examined. It is shown that optimization of temperature-time mode of furnace of patenting allowed to increase the parameter of unit from DV76 till DV96.

А. Н. САВЕНОК, В. А. СТЕФАНОВИЧ, О. И. ИГНАТЕНКО, РУП «БМЗ»

УДК 669.

ФОРСИРОВАННЫЙ НАГРЕВ – ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Начиная с 2007 г. в метизном производстве РУП «БМЗ» начал ощущаться недостаток в латунированной заготовке для увеличения объема производства проволоки РВД и металлокорда. Существующие агрегаты патентирования-латунирования работали с производительностью, соответствующей паспортным характеристикам. Закупка недостающих объемов латунированной заготовки на стороне, во-первых, не устраивала по качеству латунного покрытия, во-вторых, удорожала готовую продукцию.

Проведенные ранее работы [1] позволили заменить промежуточное патентирование прямым волочением катанки до диаметра 1,35 мм без ухудшения технологичности при изготовлении металлокорда. Окончательные свойства тонкой проволоки, из которой производится металлокорд, формируются при патентировании проволочной заготовки. Модернизация агрегатов патентирования в агрегаты патентирования – латунирования позволила уменьшить число переделов, что дало существенное снижение себестоимости конечной продукции, при этом возросли объемы производства латунированной заготовки для производства металлокорда и проволоки РМЛ. При модернизации агрегатов патентирования мощные горелки первой зоны печи были заменены на менее мощные. Соответственно максимальные рекомендуемые загрузки печей также уменьшились (табл. 1).

С момента запуска модернизированных агрегатов получаемая латунированная заготовка как для проволоки обычной прочности (НТ), так и для высокопрочной проволоки (НТ) приводила к повышенной обрывности металлокорда, хотя полученная структура соответствовала требованиям методики «Оценка металлографических характеристик кордовой стали».

При анализе причин, влияющих на обрывность, было выявлено, что температура проволоки по зонам не соответствует рекомендуемым температурно-временным параметрам. В конце третьей зоны температура проволоки значительно ниже необходимой температуры и составляла $\approx 850\text{--}860\text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 1 показана диаграмма нагрева проволоки в печи в соответствии с рекомендуемыми нормами нагрева проволочной заготовки под патентирование.

Из рисунка видно, что температура в конце третьей зоны практически должна быть на уровне $900\text{ }^\circ\text{C}$, реально же, как отмечалось выше, температура проволочной заготовки в третьей зоне составляет $860\text{ }^\circ\text{C}$, т. е. имеется неполный прогрев проволоки и, как следствие, недостаточная выдержка для гомогенизации аустенита. Получаемый неоднородный аустенит по углероду приводит к образованию участков различной прочности и пластичности по сечению проволоки после патентирования, что, вероятно, и является причиной повышенной обрывности при свивке.

Таблица 1. Сравнительные характеристики агрегатов

Номер агрегата	Номер цеха	Исходная характеристика агрегата DV	Характеристика после модернизации агрегата DV	Исходная производительность печи, т/сут		Производительность печи после модернизации, т/сут	
				min	max	min	max
5	СтПЦ-2	76	76	30	51,6	32,6	46,6
6	СтПЦ-2	76	76	30	51,6	24	34
5	СтПЦ-1	72	76	33	47	27	38,5

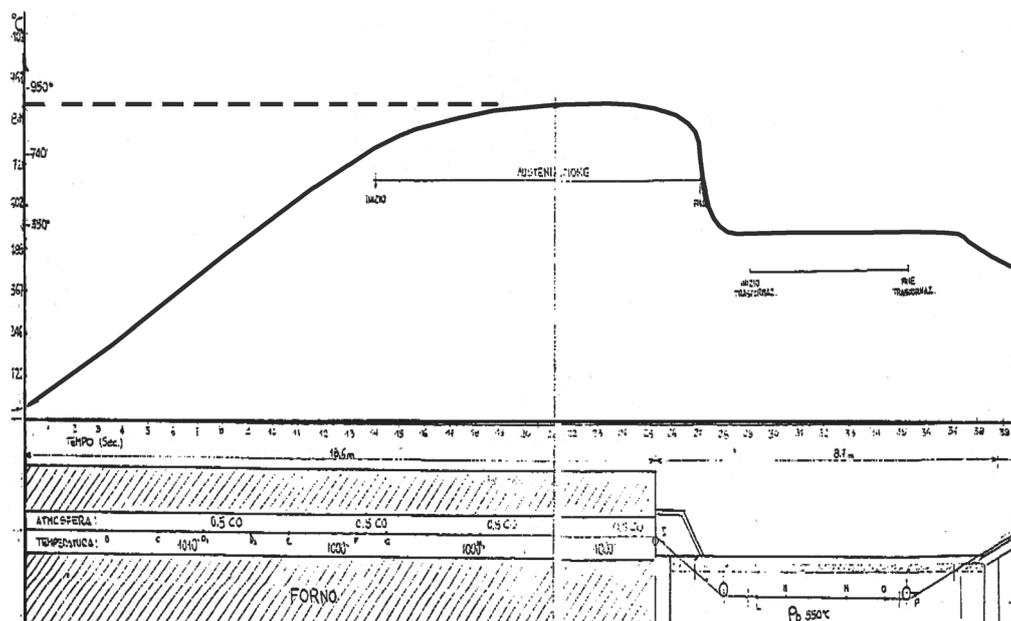


Рис. 1. Температура проволоки в печи при нагреве под патентирование в соответствии с нормами термической обработки

При работе печи патентирования контроль температуры в рабочем пространстве печи осуществляется в каждой зоне, а контроль температуры проволоки – только на выходе из четвертой зоны, на остальных зонах контроль не проводится. Несмотря на то что температура по зонам рабочего пространства печи соответствует заданным значениям, проволоочная заготовка в первой зоне не нагревается до требуемой температуры. Недогрев проволоки обусловлен низким давлением и недостаточной циркуляцией печной атмосферы. Анализ давления атмосферы печи по зонам нагрева (табл. 2) показал, что давление в первых зонах

нагрева является заниженным. Низкое давление и недостаточная циркуляция атмосферы печи обусловлены заменой горелок в первой зоне на менее мощные и отключением части горелок (рис. 2) во избежание перегрева тонкой проволоочной заготовки. Теплообмен при температурах до 700 °С в основном осуществляется за счет конвекции, уменьшение циркуляции атмосферы снижает коэффициент теплоотдачи [3].

Фирма FIB, рекомендации которой приведены в табл. 2, является производителем данных печей. В инструкции по обслуживанию печей отмечено, что желательно иметь на первых зонах печи мак-

Таблица 2. Давление по зонам печи при DV76

Номер зоны печи	1	2	3	4
Давление, мм в. ст.	530	450	420	240
Требование по НД, мм в. ст., не менее (в соответствии с ТИ)	300	300	300	400
Рекомендации фирмы FIB, мм в. ст.	450–750	400–700	250–400	150–250

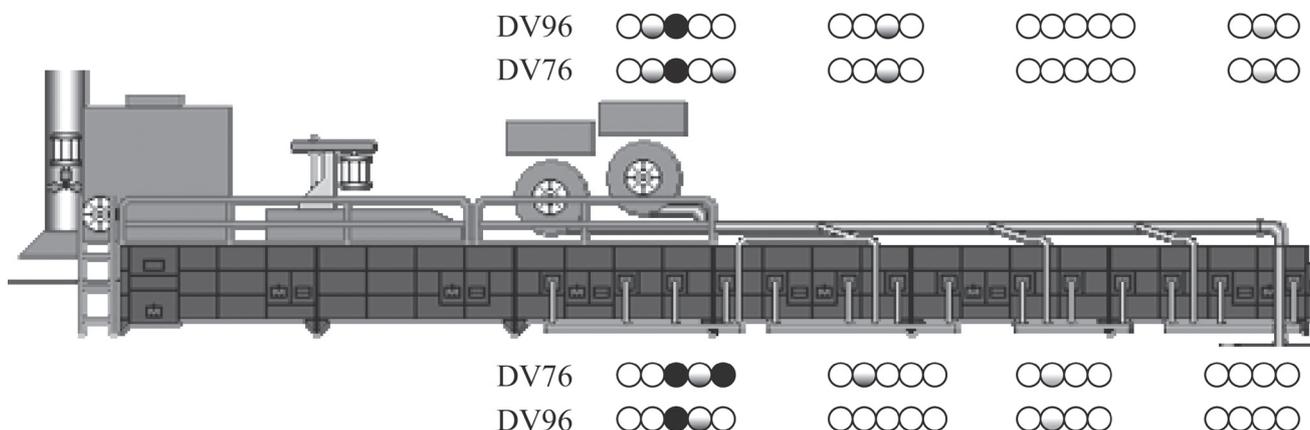


Рис. 2. Схема работы горелок печи агрегата латунирования № 6 при DV76 и DV96: ● – горелка закрыта; ◐ – горелка открыта наполовину; ○ – горелка открыта полностью

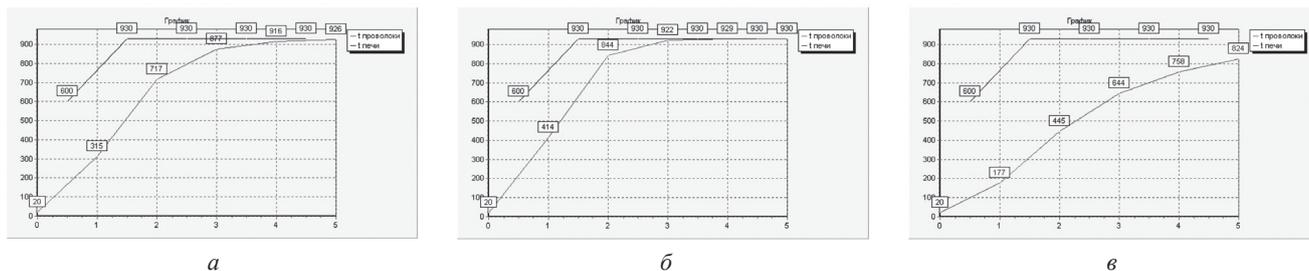


Рис. 3. Распределение температуры по зонам в печи и изделии при различных скоростях движения изделия: а – оптимальная; б – малая; в – высокая

симальное давление, что обеспечит лучший прогрев заготовки.

Из создавшейся ситуации есть только один выход – повышение скорости прохождения проволочной заготовки в печи, что приведет к возможности задействовать практически все горелки первой и второй зон и обеспечить на горелках высокое давление, что в свою очередь улучшит конвекцию атмосферы и прогрев заготовки на первых зонах, а также позволит дополнительно повысить производительность агрегатов.

Основными параметрами, определяющими качество термической обработки и производительность оборудования, являются скорость нагрева, температура поверхности и центра изделия при выходе из печи, время выдержки после достижения требуемой температуры нагрева. Значение скорости нагрева зависит от того, к какому классу относится изделие – теплотехнически «тонкое» или «массивное». Для теплотехнически «массивных» тел скорость нагрева регламентируется и не должна превышать $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} < (700-800)S$ (S – характеристический размер изделия), особенно при нагреве до 500–600 °С. Возникшие напряжения в изделии из-за перепада температур на поверхности и в центре приводят к значительным короблениям и даже трещинам. Поэтому форсированный нагрев для теплотехнически «массивных» тел практически не применяют. У теплотехнически «тонких» тел перепад температур по сечению незначительный, возникающие напряжения не вызывают коробления и трещин, что позволяет использовать форсированный нагрев.

Время выдержки после достижения требуемой температуры нагрева необходимо для гомогенизации аустенита по углероду и легирующим элементам и определяется по нормам термической обработки. Для углеродистых сталей время выдержки составляет 10–15% от времени нагрева, для легированных – 20–25% от времени нагрева. Для осуществления режима нагрева, отвечающего нормам ТО в печах непрерывного действия, необходимо рассчитывать скорость перемещения изделий. При

оптимальной скорости движения изделий по рабочему пространству печи (рис. 3, а) температурно-временные параметры обеспечивают высокое качество ТО. При меньшей скорости движения требуется температура изделия достигается раньше (рис. 3, б) и время выдержки получается большее, что снижает производительность. При большой скорости движения деталей получается недогрев (рис. 3, в).

Печи непрерывного действия имеют несколько температурных зон, в которых можно задавать требуемую температуру. Печи с электрическим нагревом имеют либо две температурные зоны с распределением мощности (в зоне нагрева – 75%, в зоне выдержки – 25%), либо три зоны с распределением мощности 50, 30, 20%. Такое распределение мощности по зонам в электрических печах ограничивает максимальную температуру, которую можно использовать при форсированном нагреве.

В топливных термических печах с непосредственной циркуляцией продуктов сгорания в печном пространстве возможно получение нескольких зон нагрева, в которых температура печи будет превышать температуру нагрева на 150–200 °С, обеспечивая максимальную скорость нагрева.

При нагреве «тонких» изделий в печах непрерывного действия температура поверхности и центра изделия практически не отличается $Bi < 0,15$, а температура печи по длине зоны нагрева постоянная $T_{\text{г}} = \text{const}$. При данных условиях нагрева устанавливается стационарный температурный режим печи и изделия по длине рабочего пространства. При таком режиме температура изделия в конце каждой зоны нагрева определяется по формуле [3]

$$T_{\text{м}} = T_{\text{г}} - (T_{\text{г}} - T_{\text{мн}}) \exp(k\alpha t / \chi \rho c).$$

При расчете коэффициента теплоотдачи α необходимо знать рассчитываемую температуру изделия в конце каждой зоны $T_{\text{м}}$. Поэтому расчет температуры $T_{\text{м}}$ для каждой зоны необходимо выполнять методом приближения. Для каждой зоны задается конечная температура изделия в конце

зоны, рассчитывается коэффициент теплоотдачи α и определяется T_m . Сравнивая заданную и рассчитанную температуру, определяется погрешность, расчет ведется до тех пор, пока погрешность становится менее 5°C .

Используя данную формулу, была разработана программа для расчета температуры нагрева теплотехнически «тонких тел» в зависимости от значения температуры в зоне нагрева (можно задавать пять зон) и скорости перемещения изделий по рабочему пространству печи.

Нагревательное оборудование состоит из предварительной камеры подогрева, обогреваемой уходящими газами, и имеет температуру $600 \pm 100^\circ\text{C}$ и газовой печи с четырьмя температурными зонами, в которых максимальная температура может достигать до 1100°C . Во время работы агрегата все горелки печи агрегата патентирования работают в режиме автоматического регулирования. Производительность агрегатов определяется параметром DV (D – диаметр проволоки, мм; V – скорость движения проволоки, м/мин).

Температура нагрева проволоочной заготовки при патентировании контролируется в четвертой зоне и должна быть $930 \pm 30^\circ\text{C}$. Балл зерна перлита контролируется после патентирования и должен быть от 3 до 7. В настоящее время для патентирования проволоки диаметром 2 мм используется форсированный нагрев с температурами по зонам (рис. 4, а) и скоростью движения проволоки 38 м/мин. При этом температура проволоочной заготовки в зоне выдержки должна быть не менее 910°C .

Для повышения производительности агрегата патентирования-латунирования необходимо увеличивать скорость движения проволоочной заготовки по рабочему пространству печи и повышать температуру в зонах нагрева для получения необходимого качества проволоочной заготовки. Повышение производительности на 10, 20 и 30% требует увеличения скорости движения проволоочной заготовки до 42, 45,5 и 49,5 м/мин соответственно и повышения температуры по рабочим зонам нагрева от 20 до 60°C . Значения температур по зонам нагрева подбирались таким образом, чтобы обеспечить температуру проволоочной заготовки в последней зоне не менее 910°C , а на выходе – $930\text{--}935^\circ\text{C}$.

На рис. 4, б, в, г показаны температурные режимы печи и проволоочной заготовки, рассчитанные с помощью разработанной программы.

Повышение скорости движения проволоочной заготовки по рабочему пространству печи требует увеличения расхода тепла, затраченного на нагрев изделия, пропорционально увеличению производительности. При этом затраты энергии по остальным статьям расхода тепла практически не увеличиваются, за исключением тепла, уносимого уходящими газами из-за повышения их температуры, что обеспечивает снижение удельного расхода топлива на термическую обработку. Повышение производительности агрегата ограничивается мощностью топливосжигающих устройств и скоростью движения проволоочной заготовки в печном пространстве, которая уменьшает время выдержки,

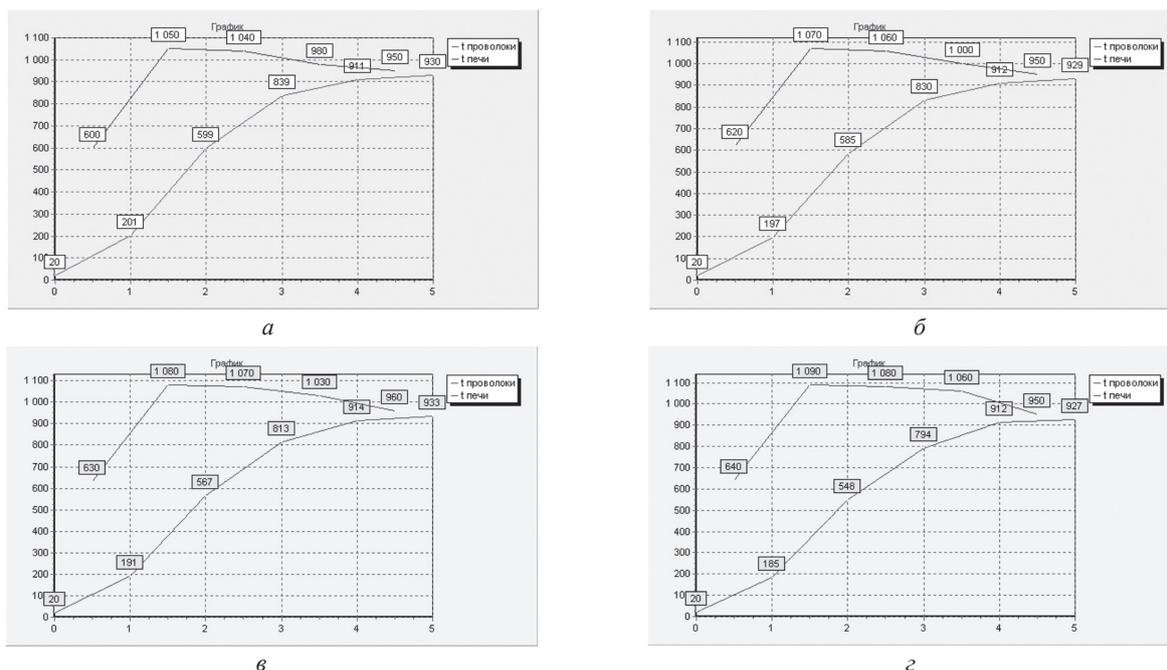


Рис. 4. Влияние скорости движения проволоочной заготовки на распределение температуры по зонам в изделии при различных скоростях движения изделия: а – 38 м/мин; б – 42; в – 45,5; г – 49,5 м/мин

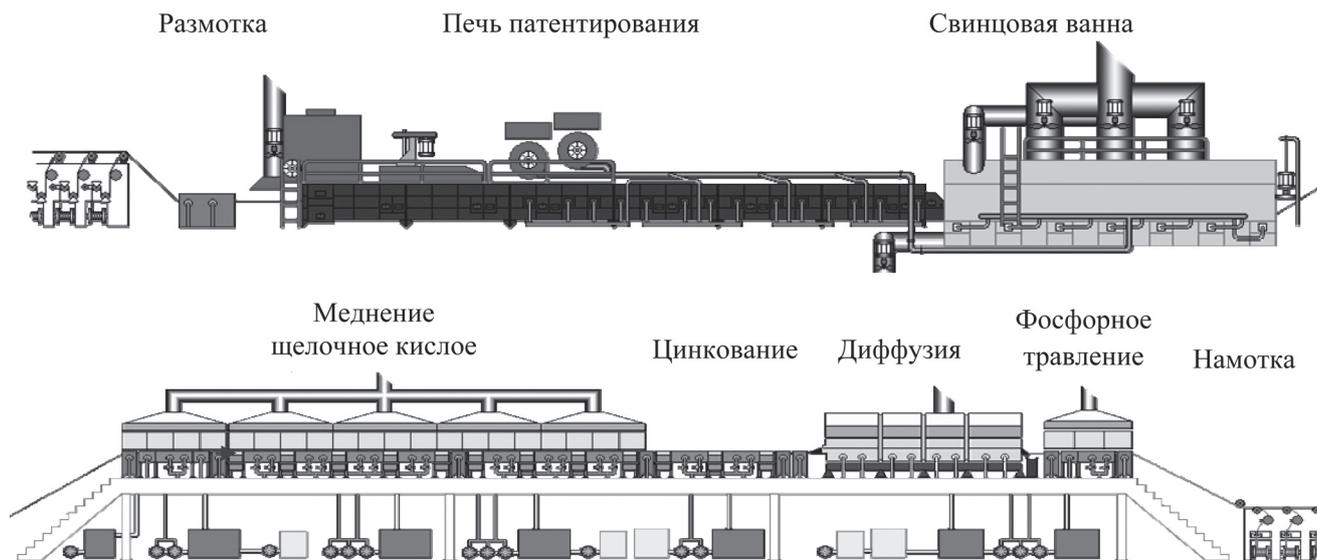


Рис. 5. Схема агрегата патентирования-латунирования № 6

что может сказаться на величине зерна перлита, а также плотностью токов ванн нанесения гальванических покрытий.

Данная программа была использована для повышения производительности агрегатов патентирования-латунирования проволоочной заготовки в условиях РУП «БМЗ». В качестве примера рассмотрим работу агрегата патентирования-латунирования № 6 СтПЦ-2.

При анализе технических характеристик агрегата отмечено, что повысить скорость прохождения проволоки по агрегату можно максимум на 30%, так как возрастают токи на ваннах травления и нанесения покрытий, а также могут быть проблемы с прогревом на термодиффузии гальванического покрытия. Повышению производительности на 30% соответствует параметр DV96, при этом максимально возможная масса латунного покрытия составит $\approx 5,5$ г/кг, что вполне приемлемо.

Агрегат патентирования-латунирования № 6 состоит из следующих основных частей: размоточного устройства, печи патентирования, ванны с расплавом свинца, ванн биполярного сернокислого травления, ванн гальванопокрытий – щелочного и кислого меднения и цинкования; термодиффузионной установки; ванны фосфорного травления, намоточного устройства (рис. 5).

Используя программу, разработанную в БНТУ, были проведены расчеты температурно-временных параметров патентирования, при этом значения температур по рабочим зонам нагрева подбирались таким образом, чтобы обеспечить температуру проволоочной заготовки на выходе из третьей зоны не менее $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на выходе из четвертой – $930\text{--}940\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Проведенные расчеты показали обоснованность предварительных выводов – неполного прогрева проволоки (рис. 6).

На рис. 7 показан температурный режим по зонам печи и температуре проволоки при патентировании на DV96. Из рисунка видно, что условия нагрева соответствуют рекомендуемым нормам нагрева (см. рис. 1).

Ускорение нагрева в первых зонах вызывает смещение процесса аустенитизации в третью зону, а в четвертой происходит более полное протекание диффузионных процессов, что позволяет достичь более высокой однородности аустенита.

В табл. 3 приведены значения температур по зонам печи, рекомендованные фирмой FIB и рассчитанные с помощью предложенной программы для DV96. Рассчитанные значения температур по зонам печи для DV96 на $15\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем для DV76.

Таблица 3. Рекомендованные температуры по зонам печи для различных значений DV

Номер зоны	1	2	3	4
Температура рекомендованная для DV96, $^{\circ}\text{C}$	1065	1045	1025	985
Температура установленная на печи по НД для DV76, $^{\circ}\text{C}$	1050	1015	1005	985
Температура рекомендованная фирмой FIB для DV76, $^{\circ}\text{C}$	1040 ± 20	1010 ± 20	1000 ± 20	950 ± 20

Повышение скорости движения проволоочной заготовки уменьшает время пребывания проволоки в свинцовой ванне, например, проволока диаметром 1,68 мм находится в ванне с расплавом свинца при DV76 13 с, а при DV96 уже 10 с. В со-

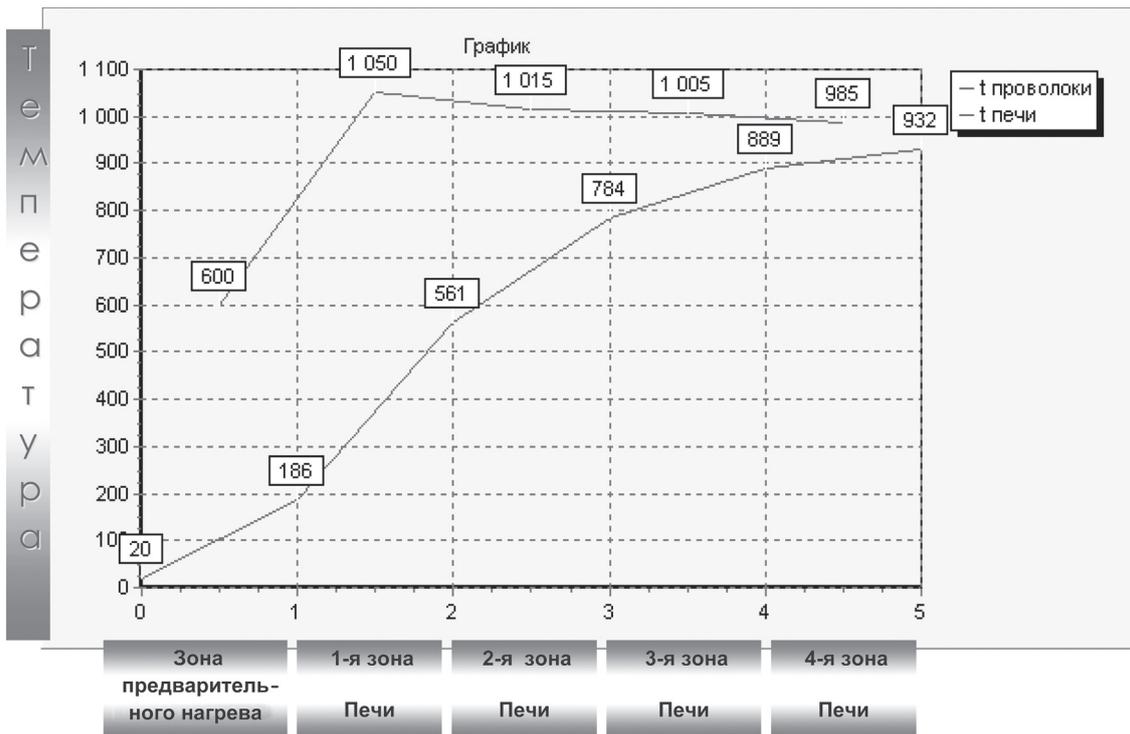


Рис. 6. Распределение температур проволоки и печи по зонам при существующем режиме DV76

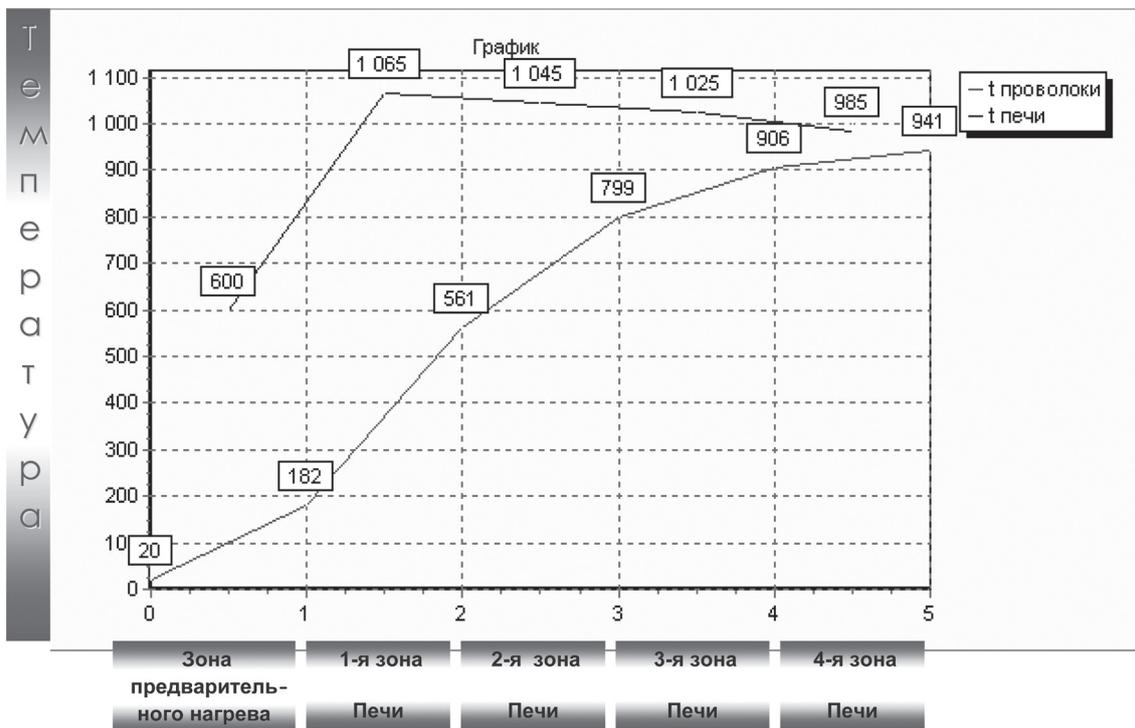


Рис. 7. Распределение температур проволоки и печи по зонам при DV96

ответствии с требованиями к механическим свойствам металлокорда изотермическая выдержка при патентировании в свинцовой ванне должна осуществляться при температурах 575–600 °С и время выдержки должно обеспечивать полное протекание процессов распада аустенита для получения оптимальной структуры [4]. Как видно из диаграм-

мы изотермического распада аустенита (рис. 8), время выдержки для протекания распада аустенита составляет 7–8 с, что является приемлемым при патентировании проволоки с параметром DV96.

На основании выполненных расчетов и проведения исследовательских работ был оптимизирован температурный режим патентирования прово-

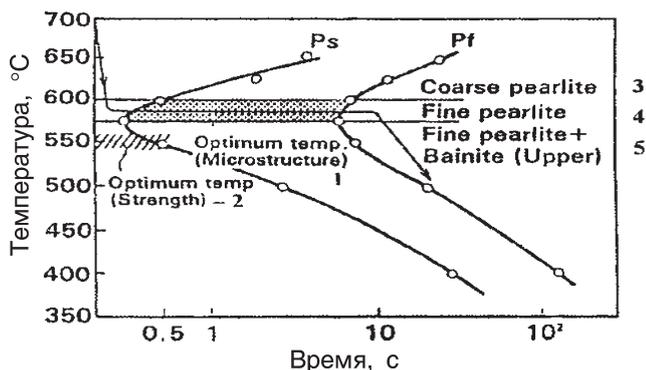


Рис. 8. Диаграмма оптимальной температуры свинцового патентирования для стальной высокоуглеродистой проволоки

лочной заготовки на агрегате патентирования-латунирования № 6. В результате установлены скоростные характеристики движения проволоки диаметром 1,68 и 1,94 мм (табл. 4).

Таблица 4. Изменение скоростных характеристик агрегата № 6

Диаметр заготовки, мм	Скорость прохождения на DV76, м/мин	Скорость прохождения на DV96, м/мин
1,68	45	57
1,94	39	49

Как следует из таблицы, скорость прохождения заготовки диаметром 1,68 мм увеличена на 26,7%, а заготовки диаметром 1,94 мм – на 25,6%. При таком увеличении скорости производительность агрегата патентирования-латунирования повысится в среднем на 2500 т латунированной заготовки в год.

После повышения скорости движения проволоочной заготовки (табл. 4) и температуры печи по

зонам (см. табл. 3) давление в первой и второй зонах возросло (табл. 5), что улучшило теплообмен в данных зонах.

Таблица 5. Давление по зонам печи

Номер зоны	1	2	3	4
Давление, мм в. ст.	710	530	400	330
Требование, мм в. ст., не менее (в соответствии с НД)	300	300	300	400

Измерение температуры проволоки на четвертой зоне печи оптическим пирометром показало, что температура проволоки составляет порядка 930 °С. Дополнительно, чтобы обеспечить лучший прогрев заготовки, температуру четвертой зоны увеличили от 985 до 1000 °С, что позволило повысить температуру проволоки ≈ на 10 °С.

Для достижения указанных температур по зонам печи для проволоки диаметрами 1,68 и 1,94 мм были открыты горелки на первой и второй зонах. Работа горелок показана на рис. 2. Как видно из рисунка, на первой зоне количество работающих горелок увеличилось – из десяти горелок первой зоны работают на полную мощность уже не четыре, а шесть, количество горелок, работающих наполовину, уменьшилось с трех до двух, соответственно полностью закрытыми остались только две горелки.

Сравнение характеристик латунированной заготовки при DV96 показало, что балл зерна увеличился в среднем на 0,5, что соответствует требованиям методики «Оценка металлографических характеристик кордовой стали» и свидетельствует об улучшении прогрева заготовки.

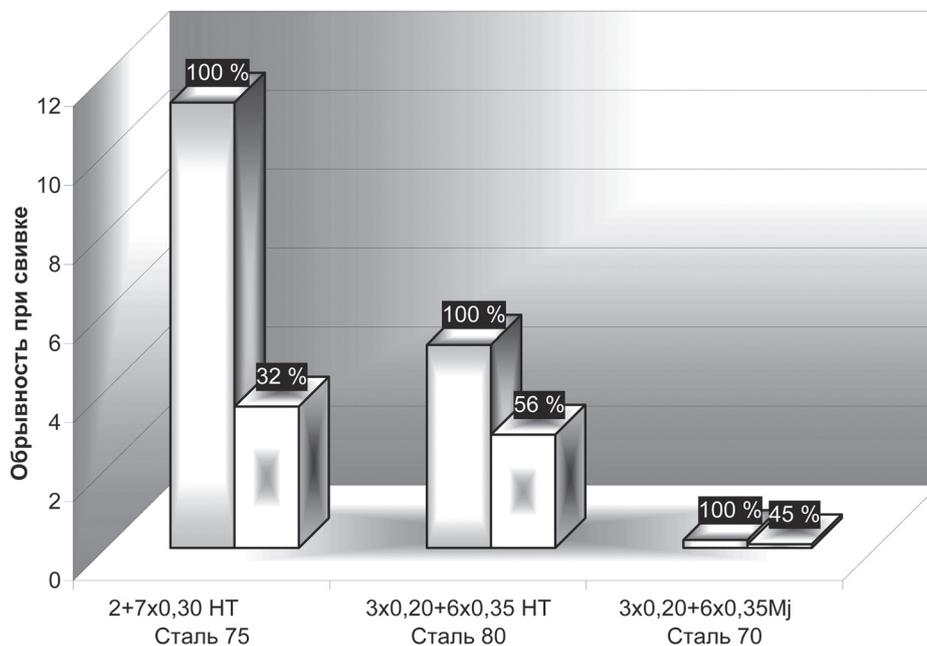


Рис. 9. Относительная обрывность металлокorda при свивке

Обрывность при свивке металлокорда различных конструкций после повышения характеристики агрегата № 6 с DV76 до DV96 снизилась в 1,79–3,14 раза (рис. 9).

Таким образом, оптимизация температурно-временного режима печи патентирования на агрегате

№ 6 СтПЦ-2 позволила увеличить параметр агрегата с DV76 до DV96, что обеспечило повышение производительности на 26% и привело к экономии по электроэнергии на 986 941 кВт·ч/год и природного газа на 171 934 м³/год, что в общем итоге обеспечило экономический эффект 286,6 млн. бел. руб.

Литература

1. Исследование процессов формирования физико-механических свойств и определение рациональных режимов пластической деформации и термообработки при производстве сверх- и ультравысокопрочной проволоки и металлокорда. Жлобин, 1999.
2. T h o m a s W. T y l. Steel patenting technology in the manufacture of steel tire cord // International Wire&Cable Conference, Bologna, Italy, November, 2007 .
3. М а с т р ю к о в Б. С. Расчеты металлургических печей. М.: Металлургия, 1986.
4. Технология производства металлокорда / Б. Голис, Я. В. Пилярчик, Г. Дая, З. Блацейовски. Нью-Йорк: Изд-во «Ассосейшн Интернешл, Инк».