

Телегин В.Е., Голубчик Э.М., Смирнов П.Н., Курбан В.В., Денисов С.В.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ХОЛОДНОКАТАНОЙ ЛЕНТЫ ДЛЯ МОНЕТНОЙ ЗАГОТОВКИ

Рассмотрены особенности технологии производства холоднокатаной ленты для монетной заготовки. Проанализированы возможности применения принципа технологической адаптации при конструировании многовариантной технологической системы. Представлены результаты исследований изменчивости качественных показателей ленты в зависимости от технологических факторов.

**Ключевые слова:** холоднокатаная лента, монетная заготовка, качество, твердость, шероховатость, адаптация.

The special features of the technology of the production of cold-rolled tape for the monetary billet are examined. The possibilities of applying the principle of technological adaptation with the construction of multivariant technological system are analyzed. The results of studies of the changeability of the quality indicators of tape in the dependence on the technological factors are represented.

**Keywords:** cold-rolled tape, monetary billet, quality, hardness, roughness, the adaptation.

На сегодняшний день, одним из широко востребованных видов металлопродукции, как правило, эксклюзивным для крупных металлургических предприятий является стальная холоднокатаная лента, используемая в различных отраслях народного хозяйства: автомобилестроении, строительстве, а также в производстве товаров народного потребления. Одним из примеров можно считать холоднокатаную ленту, предназначенную для высокоскоростной холодной вырубки монетных заготовок, производимую в ЛПЦ-8 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). В настоящее время все большее развитие получает ситуация, когда показатели качества выпускаемой ленты нормируются не только и не столько нормативными документами (стандартами), но также и дополнительными требованиями потребителей. При этом, зачастую требования потребителей либо не сочетаются с положениями стандартов, либо являются труднодостижимыми в процессе производства и переработки продукции с глубокой степенью переработки, к которой можно отнести и холоднокатаную ленту. Это диктует необходимость проведения оперативного анализа возможностей производства, поиска новых путей конструирования технологических схем изготовления такой продукции и, соответственно, разработки и активного внедрения новых подходов, например адаптационных моделей.

Отсутствие на отечественных металлургических предприятиях разработанных технологий производства ленты для монетной заготовки способствовало развитию ситуации в России с нехваткой десятирублевых монет, производство которых в массовом порядке началось с 2009 г. взамен снятых с производства бумажных купюр.

Данная лента должна обладать уникальным комплексом свойств, сочетающих ограниченный диапазон твердости HR15T в 72-76 единиц, низкую шероховатость поверхности  $Ra \leq 0,8$  мкм, а также высокую точность изготовления по толщине  $0 / -0,06$  мм. Набор указанных жестко регламентированных свойств обусловлен следующим. Ограничение низких значений твердости связано с необходимостью снижения износа инструмента при чеканке готовых монет. Достаточно низкая шероховатость поверхности обусловле-

на тем, что в процессе переработки в монетную заготовку лента подвергается операции нанесения покрытия (никелирование). Что касается высокой точности по толщине ленты, то данный аспект вызван предъявляемыми требованиями к массе и геометрии заготовки для монет.

Традиционные подходы к разработке технологии производства холоднокатаной ленты с указанным набором потребительских свойств в условиях многовариантных технологических систем, к которым можно отнести технологию в ЛПЦ-8, являются малоэффективными, так как предусматривают затратный метод «проб и ошибок» и не позволяют оперативно осуществлять «перестройку» технологии при изменении или корректировке требований заказчика. Кроме того, не достаточно полно учитываются ресурсы и возможности отдельно взятой технологической операции. Учеными ФГБОУ ВПО «МГТУ им.Г.И. Носова» совместно со специалистами ОАО «ММК» был разработан новый подход к конструированию многовариантных технологий изготовления металлопродукции с высокой добавленной стоимостью с применением принципов технологической адаптации [1-2]. Под термином «технологическая адаптация» понимается процесс целенаправленного изменения технологической системы в соответствии с определенными критериями приспособления ее структуры и функций к условиям внешней среды, обеспечивающих достижение целей системы (ожидания потребителей, требования нормативной документации).

Рассматриваемый подход предусматривает оценку технико-технологических возможностей предприятия на стадии принятия заказа, анализ технологических факторов (по переделу), влияющих наибольшим образом на изменчивость качественных показателей конечной продукции и наиболее эффективное воздействие на данные факторы для достижения целей системы.

Процесс разработки технологии производства холоднокатаной ленты для монетной заготовки проводился на основе комплексных исследований по выбору химического состава стали, режимов горячей и холодной прокатки, режимов термообработки и дрессировки ленты. При этом в качестве значимых были

выбраны следующие технологические факторы:

- уровень механических свойств горячекатаного подката, определяемый химическим составом стали, а также температурно-деформационными режимами горячей прокатки полосы и ее смотки в рулон;
- набор и последовательность технологических операций переработки горячекатаного рулонного подката в холоднокатаную ленту конечных размеров;
- уровень технологических параметров обработки металлопроката на каждой операции.

Для производства холоднокатаной ленты, предназначенной для изготовления монетной заготовки, на основе применения модели технологической адаптации был разработан алгоритм оценки возможностей многовариантной технологии с точки зрения достижения требуемого уровня свойств. Данный алгоритм представлен на рис. 1.

Ключевым моментом данного подхода является выбор вариантов адаптации и их проверка методом физического эксперимента, либо математического моделирования на основе полученных регрессионных уравнений.

При этом были выделены три возможных элемента технологической адаптации:

- $A_1$  – адаптация технологической схемы (набор операций);
- $A_2$  – адаптация технологических режимов в данной операции;
- $A_3$  – адаптация требуемого набора параметров в исходном состоянии (в данном примере, в горячекатаном подкате для производства ленты).

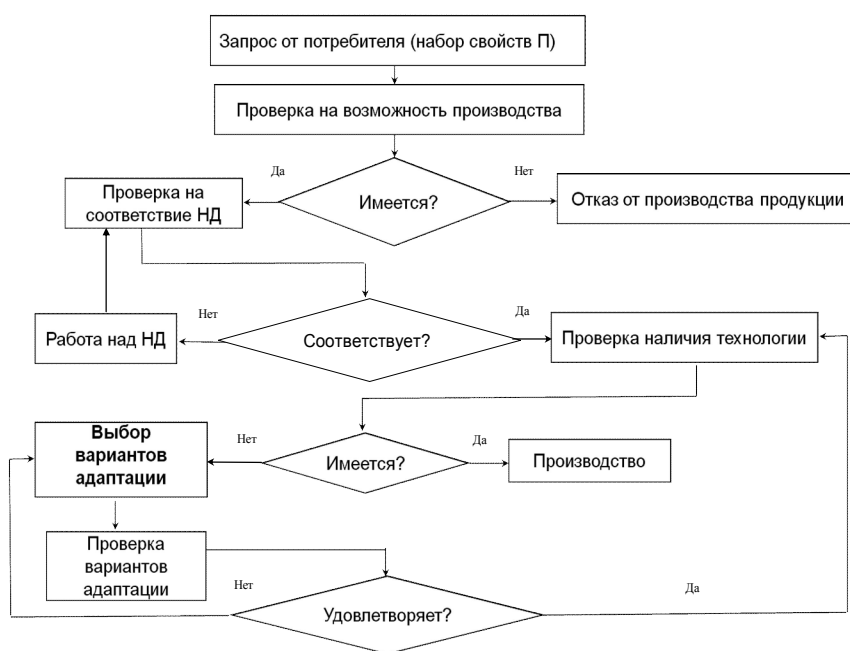


Рис. 1. Алгоритм технологической адаптации при изготовлении холоднокатаной ленты для монетной заготовки

Общее уравнение регрессии, учитывающее многовариантность рассматриваемой системы, помимо основных характеристик химического состава и горячей прокатки, содержит параметры максимально воз-

можного количества холодных прокаток ( $n = 3$ ) и термообработок ( $k = 4$ ), а также параметры операции дрессировки ленты.

В рассматриваемом случае использовался вариант адаптации, основанный на многолетней практике изготовления ленты из низкоуглеродистых марок стали и не предусматривающий корректировку схемы производства ленты. Соответственно учитывались параметры только одной прокатки и одной термообработки.

$$\begin{aligned}
 HR15T = & 215,3 \cdot C - 21,2 \cdot Nb + 129 \cdot Mn - \\
 & -419 \cdot Al - 21,2 \cdot Ln(Ti) - 0,034 \cdot T_{cm} - \\
 & -0,06 \cdot T_{отж1} + 2,4 \cdot \varepsilon_{np1} - 0,076 \cdot \tau_{отж1} + \\
 & + 7,4 \cdot \varepsilon_{op} - 0,27 \cdot h - 46,2,
 \end{aligned}$$

где  $HR15T$  – твердость готовой ленты;  $C, Mn, Al, Nb, Ti$  – массовые доли углерода, марганца, алюминия, ниобия и титана в химическом составе стали, %;  $T_{cm}$  – температура поверхности горячекатаной полосы перед смоткой ее в рулон, °C;  $h$  – толщина готовой ленты, мм;  $T_{отж}$  – температура окончательной выдержки при термообработке, °C;  $\varepsilon_{op}$  – относительное обжатие при дрессировке, %;  $\tau_{отж1}$  – продолжительность окончательной выдержки при термообработке, %;  $\varepsilon_{np1}$  – суммарное относительное обжатие при прокатке, %.

Из многолетней практики производства в ЛПЦ-8 ОАО «ММК» известно, что изготовление холоднокатаной ленты с запрашиваемой твердостью возможно только из низкоуглеродистой стали. Однако по информации, полученной от потребителя, использование традиционных марок стали не обеспечивает бездефектную переработку ленты. Так, с учетом имеющейся информации был определен следующий химический состав стали (табл. 1).

Наиболее характерные вариации химического состава в рамках исследований приведены в табл. 2. Вариации касались содержания углерода, а также микрорегулирующих элементов. Общеизвестным является факт наследуемости свойств горячекатаного подката при производстве холоднокатаной металлопродукции. Проведенными исследованиями было установлено, что требуемую нормируемую твердость холоднокатаной ленты можно получить только при максимальном приближении к ней твердости горячекатаной полосы. Поэтому наряду с подбором химического состава была проведена регламентация режимов горячей прокатки на ШСП 2000 ОАО «ММК». При этом температура завершения стадии пластической деформации на стане составила  $900 \pm 20$  C, а температура смотки в рулон –  $730 \pm 20$  C.

Таблица 1

Химический состав стали для монетной ленты

Массовая доля элементов, %											
C	Si	N	S	P	Cr	Ni	Cu	Nb	Ti	Mn	Al
Не более						В диапазоне					
0,007	0,03	0,008	0,025	0,020	0,05	0,10	0,10	0,02 – 0,05	0,015 – 0,035	0,20 – 0,35	0,02 – 0,07

Таблица 2

Вариации химического состава стали для монетной ленты

Номер плавки	Массовая доля, %			Твердость, ед.		Примечание
	C	Nb	Ti	Подкат	Лента	
				HRB	HR15T	
324256	0,01	0,022	0,019	58-64	79-83	Перевод металла на другой заказ
325804	0,08	0,020	0,020	58-64	75-82	Замечания потребителя по выпадкам твердости
225102	0,007	0,054	0,042	51-56	75-76	
125295	0,007	0,028	0,024	52-55	75-76	
117465	0,006	-	0,023	58-61	79-82	Возврат металла
120529	0,006	0,025	0,023	53-57	75-76	
323856	0,005	0,025	0,026	52-58	74-76	
110647	0,005	0,047	0,036	53-57	76-78	Замечания потребителя по выпадкам твердости
325289	0,004	0,027	0,019	52-58	74-76	
325806	0,004	0,024	0,022	50-57	73-75	

Снижение температур ниже указанных приводит к твердости горячекатаной полосы свыше 58 единиц HRB, что, в свою очередь, не позволяет обеспечить требуемую низкую твердость готовой ленты. Технологические вариации по температурным режимам горячей прокатки (температуры смотки полосы) приведены в табл. 3.

С учетом «жестких» требований к точности по толщине ленты, а также для обеспечения требуемой твердости и шероховатости поверхности и отсутствия дефектов «пятна слипания» при высокотемпературном колпаковом отжиге были определены деформационно-скоростные параметры холодной прокатки и последующей дрессировки ленты в условиях станов 630 ОАО «ММК».

При этом, основными особенностями прокатки на 5-клетевом стане можно считать следующие:

- прокатка швов без замедления скорости (рис. 2);
- снижение натяжения на моталке стана на 15% от расчетного системой автоматического регулирования толщины и натяжения;
- выбор подката исходя из формулы:

$$h_{зк} = 3,5e^{0,42h_n} - 1,5,$$

где  $h_n$  – толщина готовой ленты, мм;

– выбор уставок исходя из формулы

$$h_{уст} = 0,98 \cdot h_n^{1,026};$$

– шероховатость поверхности бочки валков клетки №5 Ra в диапазоне 2,8–3,2 мкм.

Таблица 3

Вариации температуры смотки подката для монетной ленты

Номер плавки	Массовая доля, %			Т см, °C	Твердость, ед.		Примечание
	C	Nb	Ti		Подкат	Лента	
					HRB	HR15T	
324256	0,01	0,022	0,019	660-700	58-64	79-83	Перевод металла на другой заказ
325804	0,08	0,020	0,020	660-690	57-64	76-82	Замечания потребителя по выпадкам твердости
225102	0,007	0,054	0,042	690-720	51-56	75-76	
125295	0,007	0,028	0,024	700-730	52-55	74-76	
117465	0,006	-	0,023	600-650	58-61	79-82	Возврат металла
120529	0,006	0,025	0,023	690-710	53-57	75-76	
325804	0,005	0,025	0,026	710-730	52-58	74-76	
110647	0,005	0,047	0,036	600-630	55-58	76-78	Замечания потребителя по выпадкам твердости
325289	0,004	0,027	0,019	690-730	52-58	74-76	

Основными особенностями процесса дрессировки на 2-клетевом стане 630 явились следующие:

– выбор относительных обжатий исходя из формулы

$$\varepsilon = (-0,0114 \cdot \ln(h_n - \frac{\Delta h}{2}) + 0,017) \cdot 100\%,$$

где  $\Delta h$  – требуемая разнотолщинность, мм;  $h_n$  – толщина готовой ленты, мм;

– шероховатость поверхности бочки валков клетки №2 не более 0,6 мкм;

– дрессировка швов также без замедления скорости.

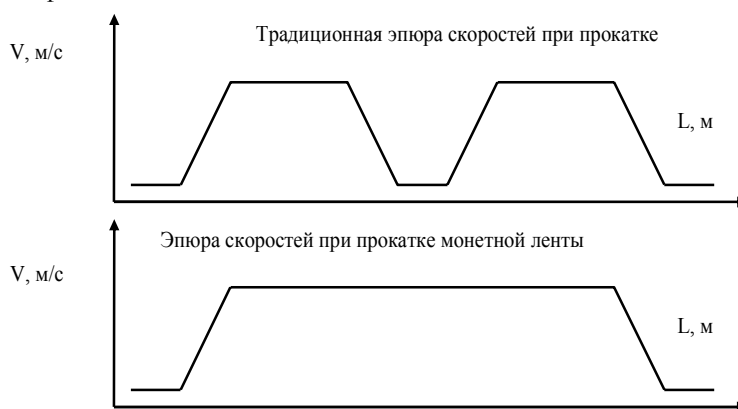


Рис. 2. Вид эпюры скоростей при холодной прокатки ленты для монетной заготовки

В процессе проведенных исследований был также разработан режим термообработки холоднокатаной ленты в колпаковых печах с азотно-водородной защитной атмосферой. Для получения требуемого уровня свойств была проведена серия экспериментов по различным вариантам термообработки (табл. 4).

Таблица 4

Исследуемые режимы термообработки ленты для монетной заготовки

№ п/п	Режим нагрева металла при рекристаллизационном отжиге с максимальной температурой по стендовой термопаре, °С	Общее время нагрева, ч	HR15T	Примечание
1	4-ступенчатый Tст max = 690	40	76-82	Возврат металла потребителем
2	5-ступенчатый Tст max = 710	38		
3	6-ступенчатый Tст max = 710	46	79-83	Перевод металла на другой заказ
4	7-ступенчатый Tст max = 720	55	76-78	Замечания потребителя по несоответствию значений твердости
5	8-ступенчатый Tст max = 740	49	75-76	Перерасход газа
6	9-ступенчатый Tст max = 740	51	74-76	
7	6-ступенчатый Tст max = 750	45	74-76	
8	5-ступенчатый Tст max = 750	45	73-75	-

Разработанный режим (рис. 3) предусматривает пятиступенчатый нагрев рулонов холоднокатаной полосы первоначально до температуры 370°С с выдержкой не менее 3 ч (1 ступень), после чего до температуры 500°С с выдержкой не менее 5 ч (2 ступень).

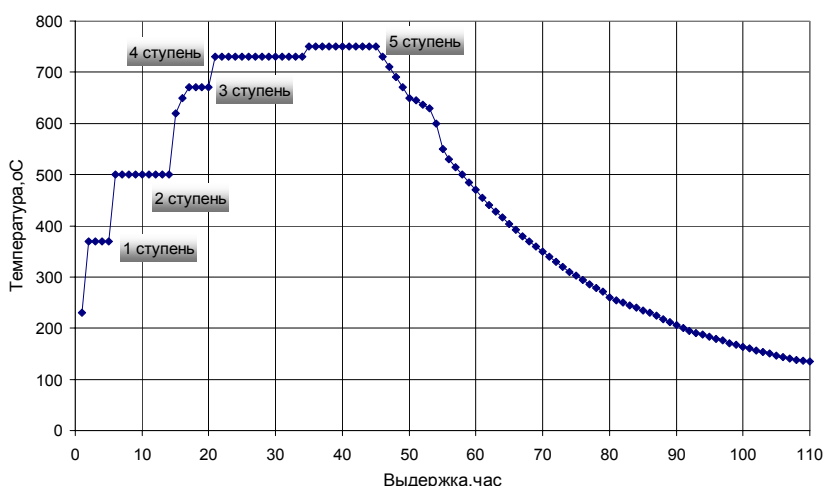


Рис. 3. Режим термообработки монетной ленты

Далее режим термообработки следующий: ступенчатый нагрев до температуры 670°С с выдержкой не

менее 3 ч (3 ступень), до температур предварительной (4 ступень) и окончательной (5 ступень) выдержки. При этом продолжительность предварительной выдержки составляет не менее 11 ч, окончательной – не менее 8 ч.

Для предотвращения свариваемости витков полосы и повышения энергоэффективности процесса термообработки охлаждение производится с прекращением подачи теплоносителя и с принудительной конвекцией защитного газа в подмуфельном пространстве до температуры 630°С. Далее снимается колпак и охлаждение производится под муфелем до температуры 135°С, после – ускоренное охлаждение на спокойном воздухе.

При этом назначение температур предварительной и окончательной выдержки осуществляется по зависимости, связывающей исходную твердость горячекатаного подката.

$$HRB = 129 \cdot Mn - 419 \cdot Al + 21.2 \cdot Ln(Ti) - 1.7 \cdot \frac{Nb}{C} - 0.18 \cdot T_{CM} - 0,79 \cdot h + 266,$$

где HRB – твердость горячекатаного подката; C, Mn, Al, Nb, Ti – массовые доли углерода, марганца, алюминия, ниобия и титана в химическом составе стали, %; T<sub>CM</sub> – температура поверхности горячекатаной полосы перед смоткой ее в рулон, °С; h – толщина горячекатаного подката, мм.

Таким образом, в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований по разработке технологии холоднокатаной ленты для монетной заготовки были получены следующие результаты:

- разработан алгоритм процесса адаптации многовариантной технологической системы «производство холоднокатаной ленты», предусматривающей получение сложного достижимого уровня потребительских свойств;

- разработана математическая модель влияния химического состава стали, режимов горячей прокатки, термообработки и дрессировки ленты на один из основных нормируемых потребителем показателей ее качества - твердость HR15T;

- разработана эффективная технология производства холоднокатаной ленты для монетных заготовок.

Список литературы

1. Голубчик Э.М., Телегин В.Е. Разработка принципов технологической адаптации при производстве металлопродукции в многообъектных технологических системах // Цветные металлы 2011: сб. докл. III междунар. конгресса в составе XVIII Междунар. конф. «Алюминий Сибири», VII Симпозиума «Золото Сибири». Красноярск: СФУ; ООО «Версо», 2011. С. 597-601.
2. Голубчик Э.М., Телегин В.Е., Хохлов А.В. Построение адапционных моделей при проектировании многообъектных технологических систем // Управление большими системами: материалы VIII школы-конференции молодых ученых. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. С. 318-321.

**Bibliography**

1. Development of the principles of technological adaptation with the production of metal production product in the multiobject technological systems. Golubchik E.M., Telegin V.E. / «Nonferrous metals 2011» coll. report. III Int. Congress in the composition of VII Symposium «Gold of Siberia» Krasnoyarsk: SFU, JSC «Verso». 2011. P. 597-601.
2. Construction of adaptive models with the design of multiobject technological systems. Golubchik E.M., Telegin V.E., Khohlov A.V. / Control of the large systems: the materials VIII of the school- conference of young scientists. Magnitogorsk: Publishing house Magnitogorsk. State. tech. university named after G.I. Nosova. 2011. P. 318-321.

УДК 621.771

Румянцев М.И., Шубин И.Г., Попов А.О., Шурыгин В.И.

## ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ НА ШСГП ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ КОНТРОЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ПОЛОСЫ

Описан процесс работы программы автоматизированного проектирования в режиме учета стохастичности процесса прокатки. Выполнено сравнение результативности прокатки в чистовой группе ШСГП 2000 ОАО «ММК» на примере полосы 4x1180 мм из стали 09Г2С при различных вариантах распределения обжатий по клетям и найден режим, обеспечивающий удовлетворительную результативность по комплексу характеристик процесса и прокатанной полосы.

**Ключевые слова:** автоматизированное проектирование, широкополосный стан горячей прокатки, стохастичность процесса, результативность прокатки, разнотолщинность, энергосиловые параметры, температура конца прокатки.

The process of computer aided design functioning in stochasticity mode is described. The effectiveness comparison in finishing train of wide strip hot rolling mill is performed for the 4x1180 mm strip for the different reduction strategies. Finally, the technology which maintains satisfactory effectiveness for the whole range of both process and profile parameters was developed.

**Keywords:** computer-aided design, wide strip hot rolling mill, process stochasticity, process effectiveness, polythickness, energy-power parameters, finishing temperature.

При создании новых и совершенствовании существующих режимов горячей прокатки полос широко применяются компьютерные программы автоматизированного проектирования [1]. В известных реализациях, как правило, выполняется точечная оценка параметров процесса и прокатываемого металла без учета стохастичности прокатки [2]. Оценка результатов проектирования без учета объективно существующей вариации параметров может стать причиной ошибочных выводов относительно возможности прокатки по разработанным режимам и особенно выводов относительно качества прокатанных полос. С целью повышения достоверности оценок проектируемых режимов в программе [3] был реализован алгоритм, учитывающий возмущения процесса прокатки (рис. 1).

Алгоритм проектирования начинается с процедуры имитации температурного состояния сляба для каждой точки полосы из числа точек, заданного пользователем. Процесс имитации реализован с использованием процедуры генерации случайного числа по закону нормального распределения:

$$t_{сл(i)} = RndNormal(t_{сл.ном}, s), \quad (1)$$

где  $t_{сл.ном}$  – номинальная температура нагрева сляба (математическое ожидание);  $s$  – стандартное отклонение.

На основании практических данных установлена взаимосвязь стандартного отклонения с величиной температуры нагрева:

$$s = 0,017t_{сл.ном} - 15,5. \quad (2)$$

Кроме того, с применением процедуры (1) из диапазонов варьирования, настраиваемых пользователем, в каждом проходе для каждой точки на полосе генерируются температуры окружающей среды, охлаждающей воды и рабочих валков. Параметры соответствующих распределений указаны в табл. 1.

Таблица 1

**Диапазоны вариаций температур окружающей среды, охлаждающей воды и рабочих валков для имитации возмущений на ШСГП 2000 ОАО «ММК»**

Клеть	$x_{min}$	$x_{max}$	$\bar{x}$	$s$
R1	76	81	79	0,7
R2	74	76	75	0,8
R3	68	73	71	1
R4	64	68	66	0,8
R5	55	64	60	0,7
R6	54	60	57	0,7
F1	77	85	81	0,83
F2	77	85	81	0,83
F3	72	80	76	0,83
F4	71	79	75	0,67
F5	65	75	70	0,83
F6	66	75	70	0,83
F7	62	70	66	0,83

На всех участках стана распределение температуры технической воды имеет следующие параметры:  $x_{min} = 15$ ;  $x_{max} = 35$ ;  $\bar{x} = 20$ ;  $s = 3,3$ . Параметры распределения температуры воздуха:  $x_{min} = 15$ ;  $x_{max} = 20$ ;  $\bar{x} = 17,5$ ;  $s = 0,8$ .