

С.И.Бадюк*Институт черной металлургии НАН Украины им.З.И.Некрасова***АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОРТОВЫХ ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНЫХ АГРЕГАТОВ НА ТОЧНОСТЬ ГОТОВОГО ПРОКАТА**

Целью работы является исследование условий формирования точности геометрических размеров проката в литейно-прокатных комплексах. Приведены аналитические исследования условий формирования точности геометрических размеров сортового проката в линиях литейно-прокатных агрегатов (ЛПА), схемы с совмещением многоручьевого машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и прокатного стана со стыковой сваркой заготовок и схемы с прямым совмещением разливки и прокатки. Показано, что точность готового проката, произведенного на обеих схемах ЛПА, в целом близка, однако условия формирования геометрических размеров поперечного сечения проката несколько различаются. Для схемы ЛПА с совмещением многоручьевого МНЛЗ показана необходимость индукционного подгрева заготовок после машины стыковой сварки.

Ключевые слова: литейно-прокатные агрегаты, схемы, совмещение разливки и прокатки

Введение. В настоящее время национальными и международными стандартами выдвигаются достаточно жесткие требования к точности сортового проката. Характерным является тенденция к постепенному ужесточению этих требований. Практика работы современных сортовых станов в составе литейно-прокатных агрегатов (ЛПА) или комплексов (ЛПК) показывает, что в качестве исходной заготовки могут быть использованы профили различных сечений. Температура нагрева заготовок также может отличаться. При этом для уменьшения парка прокатных валков калибровки должны быть максимально унифицированы между собой. Кроме того некоторые конструктивные особенности различных схем ЛПА и ЛПК могут оказывать влияние на точность размеров сортового проката. Однако в научно-технической литературе недостаточно данных о влиянии конструкций агрегатов и технологических параметров прокатки на точность сортового проката, произведенного на сортовых ЛПА и ЛПК.

Постановка задачи. Основными характеристиками точности сортового проката являются отклонения от толщины, ширины, диаметра и овальности поперечного сечения круглого проката. Допустимые отклонения от номинальных размеров круглого проката регламентируются ДСТУ 4738. По точности прокат подразделяется на особо высокой (АО1), высокой (А1, А2, А3), повышенной (Б1) и обычной (В1, В2, В3, В4, В5) точности.

Целью настоящей работы является исследование условий формирования точности геометрических размеров проката при использовании

различных схем и температурно-скоростных режимов прокатки в ЛПА и ЛПК.

Анализировали две схемы действующих в настоящий момент сортовых ЛПА и ЛПК:

ЛПА-1 - схема с совмещением многоручьевой МНЛЗ и прокатного стана со стыковой сваркой заготовок перед входом в стан;

ЛПА-2 – схема с прямым совмещением разливки и прокатки.

Скорость прокатки в ЛПА-1 принята максимально достигнутой в настоящее время для каждого профиля. Скорость прокатки в ЛПА-2 соответствует скорости разливки. Значения основных технологических и конструктивных параметров принятых схем ЛПА и ЛПК приведены в работе [1].

Для схемы с совмещением многоручьевой МНЛЗ и прокатного стана со стыковой сваркой заготовок перед входом в стан характерно неравномерное распределение температуры по длине бесконечной заготовки (рис.1) [2]. Такое распределение температуры формируется из-за неравномерной скорости движения заготовки на участке «нагревательная печь - стыкосварочная машина - прокатный стан» (температурный клин В-Г), охлаждения концов заготовок при их захвате водоохлаждаемыми губками стыкосварочной машины (точки B_1 и B_2), а также повышения температуры непосредственно в зоне сварного шва (точка А). Диапазон отклонений размеров готового проката будет определяться, главным образом, разницей температур между точками В и B_1 . Так как зона самого сварного шва (А) имеет небольшую протяженность, его температура быстро снижается за счет осевой теплопроводности. Кроме того, этот участок обычно вырезается с готового проката и его влияние на точность готового проката минимально.



Рис.1. Схема распределения температуры по длине сваренной бесконечной заготовки [2]

По мере прохождения раскатом прокатного стана разница температуры между точками В и B_1 уменьшается и зависит от температуры нагрева заготовки, ее сечения, времени контакта водоохлаждаемых губок стыкосварочной машины с поверхностью заготовки, наличия индукционного подогрева заготовки после ее сварки. Наибольшее влияние оказывают два последних фактора. Рассчитать фактические значения этой разницы температур сложно. Поэтому ее задавали, исходя из следующих данных. В работе [2] приведено, что разница температур между точками В и B_1 перед входом в проволочный блок прокатного стана составляет в среднем 40°C

(при отсутствии индукционного подогрева заготовок после сварки и принудительного охлаждения раскатов перед блоком). Исходя из этого, нами рассчитано, что исходная разность температур на заготовке составляет 80-120⁰С. Кроме того, мы учли, что время контакта водоохлаждаемых губок с поверхностью заготовки может отличаться практически в два раза (от 16 до 33⁰С). Поэтому в расчетах приняли три значения разницы температур заготовки в точках В и Б₁ – 50, 100 и 150⁰С.

У схемы с прямым совмещением (ЛПА-2) из-за того, что заготовка на участке «МНЛЗ - прокатный стан» движется с постоянной скоростью, отсутствует температурный клин и это способствует повышению точности размеров готового проката. Однако скорость конца прокатки профилей одинакового типоразмера для данной схемы ниже, чем в ЛПА-1. Это приводит к более низким температурам прокатки, особенно в последних клетях стана, что может снижать точность готового проката.

Для выбранных ЛПА аналитически исследовано влияние размера исходных заготовок (квадрат 125, 140 и 165 мм), отклонений размеров заготовок (±1 %) и температуры заготовок (1200 и 1000⁰С). Исследование точности готового проката производилось для следующих профилей: катанка ø5,5 мм, круг ø12 мм (исходная заготовка 125, 140 и 165 мм), а также круг ø40 и 65 мм (исходная заготовка 165 мм). Требования к точности выбранных размеров проката по ДСТУ 4738 приведены в табл.1.

Таблица 1. Требования к точности выбранных для исследования размеров проката по ДСТУ 4738

Диаметр проката, мм	Предельные отклонения при точности прокатки, мм					
	A1	Б1	В1	АО1	A2	В2
5,5	+0,1 -0,2	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	–	±0,15	±0,4
12	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	±0,12	±0,2	±0,4
40	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7	–	±0,3	±0,8
65	+0,1 -0,9	+0,3 -1,1	+0,5 -1,1	–	±0,5	±1

Исследование формирования точности размеров готового проката, производили с использованием математической модели, представленной в работах [3,4].

Значения отклонений размеров поперечного сечения по высоте и ширине в текущем проходе рассчитывается по зависимостям

$$\delta h_1 = H_K \cdot \delta h_K + H_h \cdot \delta h_0 + H_B \cdot \delta b_0 + H_T \cdot \delta T ;$$

$$\delta b_1 = B_K \cdot \delta h_K + B_h \cdot \delta h_0 + B_B \cdot \delta b_0 + B_T \cdot \delta T ,$$

где H_K , H_h , H_B , H_T , B_K , B_h , B_B , B_T – технологические коэффициенты, характеризующие влияние колебаний технологических параметров на изменение размеров раската по высоте и ширине соответственно;

δh_K – увеличение высоты сечения раската, вызванное «пружиной» прокатной клетки;

δh_0 и δb_0 – отклонение размеров сечения раската по высоте и ширине в предыдущем проходе;

δT – вторичное изменение температуры в каждой клетке прокатного стана, вызванное отклонением температурно-скоростных параметров прокатки относительно базовых.

Модули жесткостей прокатных клетей принимались в соответствии с рекомендациями работы [5]: в черновых клетях – 2,8 МН/мм, промежуточных – 2,3 МН/мм, предчистовых – 1,8 МН/мм, в клетях проволочного блока 2,0 МН/мм.

Изложение основных результатов исследования.

Расчетные отклонения размеров поперечного сечения готового проката при производстве в ЛПА-1 приведены в табл. 2-4.

Таблица 2. Расчетные значения отклонений размеров поперечного сечения катанки $\varnothing 5,5$ мм при производстве в ЛПА-1

Температура нагрева, °С	ΔT_{B-B1} , °С	Отклонение размеров проката при размерах заготовки, мм					
		125×125		140×140		165×165	
		δh	δb	δh	δb	δh	δb
1200	0	0,013	0,021	0,013	0,020	0,012	0,018
	50	0,013	0,025	0,014	0,024	0,013	0,022
	100	0,014	0,028	0,014	0,027	0,013	0,025
	150	0,014	0,031	0,015	0,031	0,014	0,029
1000	0	0,014	0,034	0,016	0,034	0,015	0,033
	50	0,015	0,037	0,017	0,039	0,016	0,036
	100	0,015	0,038	0,017	0,041	0,016	0,039
	150	0,015	0,040	0,017	0,041	0,017	0,042

Значения расчетных отклонений размеров поперечного сечения готового проката в ЛПА-1 произведенного из заготовки 165×165 мм (температура заготовки 1200 °С, разница температур $\Delta T_{B-B1} = 100$ °С) показаны на рис. 2.

Схема изменения размеров по длине готового проката, произведенного в ЛПА-1, показана на рис. 3. Минимальный диаметр проката (D_{\min})

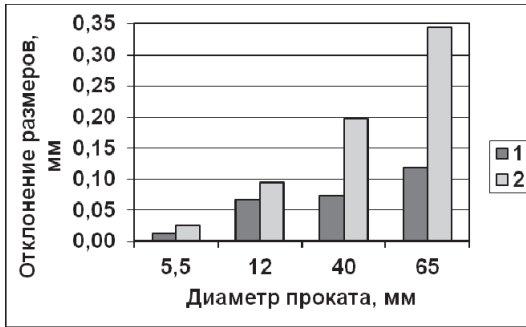
соответствует головному участку заготовки, обладающему максимальной температурой, а максимальный (D_{\max}) – участку контакта водоохлаждаемых губок стыкосварочной машины с поверхностью заготовки, который обладает минимальной температурой.

Таблица 3. Расчетные значения отклонений размеров поперечного сечения круга $\varnothing 12$ мм при производстве в ЛПА-1

Температура нагрева, °C	$T_{В-Б1}$, °C	Отклонение размеров проката при размерах заготовки, мм					
		125×125		140×140		165×165	
		Δh	Δb	Δh	Δb	Δh	Δb
1200	0	0,049	0,067	0,049	0,066	0,057	0,070
	50	0,054	0,082	0,053	0,081	0,062	0,083
	100	0,058	0,097	0,057	0,094	0,066	0,095
	150	0,062	0,109	0,061	0,106	0,070	0,106
1000	0	0,065	0,121	0,064	0,117	0,074	0,116
	50	0,068	0,131	0,058	0,135	0,059	0,133
	100	0,071	0,140	0,070	0,136	0,080	0,134
	150	0,074	0,149	0,072	0,144	0,083	0,142

Таблица 4. Расчетные значения отклонений размеров поперечного сечения круга $\varnothing 40$ и 65 мм при производстве в ЛПА-1 из заготовки сечением 165×165 мм

Температура нагрева, °C	$T_{В-Б1}$, °C	Отклонение размеров проката диаметром, мм			
		40		65	
		Δh	Δb	Δh	Δb
1200	0	0,054	0,099	0,084	0,174
	50	0,063	0,145	0,100	0,255
	100	0,074	0,198	0,119	0,345
	150	0,087	0,256	0,141	0,445
1000	0	0,101	0,319	0,167	0,559
	50	0,116	0,387	0,199	0,687
	100	0,132	0,462	0,236	0,832
	150	0,150	0,543	0,279	0,995



1 – высота; 2 – ширина

Рис. 2. Расчетные значения отклонений размеров поперечного сечения проката диаметром 5,5, 12, 40 и 65 мм в ЛПА-1 при температуре заготовок 1200 °С и разнице температур $\Delta T_{В-Б1} = 100$ °С

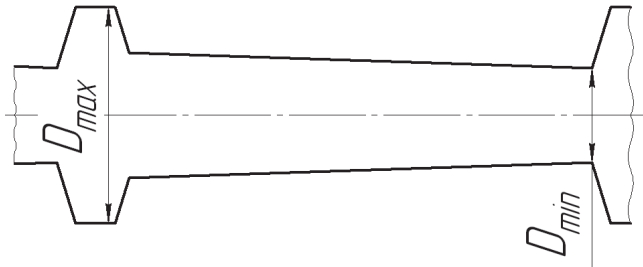


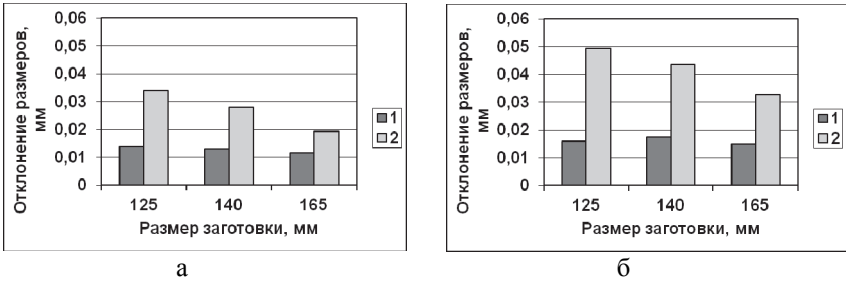
Рис. 3. Схема изменения размеров по длине готового проката, произведенного в ЛПА-1

Анализ приведенных данных позволяет сделать следующие выводы. Точность готового проката, произведенного в ЛПА-1, определяется отклонениями ширины. С увеличением диаметра проката и уменьшением температуры начала прокатки точность его размеров понижается. Размеры исходной заготовки и их отклонение в исследованном диапазоне практически не влияют на точность готового проката в ЛПА-1.

Для обеспечения высокой точности профилей крупных сечений (диаметром 40 мм и более), прокатываемых в ЛПА-1, необходим индукционный подогрев заготовок после машины стыковой сварки. При производстве профилей малых сечений (диаметром 5,5-12 мм) из заготовок с температурой 1200°С расчеты не показали необходимости индукционного подогрева заготовок после машины стыковой сварки. Однако, с учетом влияния неучтенных в расчете факторов (износ валков и точность их установки, колебание межклетевых натяжений), применение индукционного подогрева также целесообразно, а при пониженной температуре заготовок - обязательно.

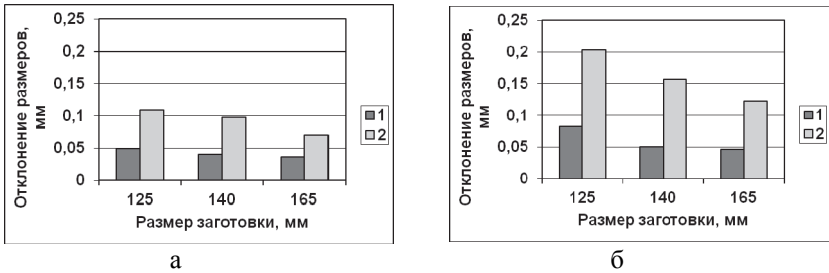
На рис. 4-6 приведены результаты расчета отклонений размеров попе-

речного сечения готового проката при производстве в ЛПА-2.



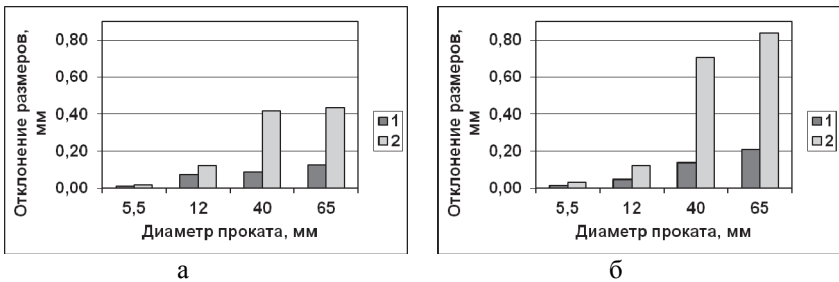
1 – высота; 2 - ширина

Рис. 4. Расчетные значения отклонений размеров поперечного сечения канатки $\phi 0,5$ мм в ЛПА-2 при температуре заготовок 1200 (а) и 1000 °С (б)



1 – высота; 2 - ширина

Рис. 5. Расчетные значения отклонений размеров поперечного сечения круга $\phi 12$ мм в ЛПА-2 при температуре заготовок 1200 (а) и 1000 °С (б)



1 – высота; 2 – ширина. Размер заготовок 165×165 мм

Рис. 6. Расчетные значения отклонений размеров поперечного сечения проката в ЛПА-2 при температуре заготовок 1200 (а) и 1000 °С (б)

Полученные данные показывают, что точность проката, произведенного в ЛПА-2 близка к точности проката, произведенного в ЛПА-1. Вместе с тем, в отличие от ЛПА-1, в ЛПА-2 точность проката существенно повышается с увеличением размеров поперечного сечения заготовки.

Выводы.

Проведенные аналитические исследования условий формирования точности геометрических размеров сортового проката в линиях ЛПА и ЛПК различного типа показали следующее. Установлено, что точность готового проката при любой схеме ЛПА определяется отклонениями его ширины (размера проката в направлении продольной оси валков), которые в 1,5-4 раза больше, чем отклонения толщины (размера проката в направлении обжатия валками). С увеличением диаметра проката и уменьшением температуры начала прокатки точность его размеров понижается.

Точность проката, произведенного в ЛПА-1 и ЛПА-2 в целом близка, однако условия формирования геометрических размеров поперечного сечения проката несколько различаются. В ЛПА-1 размеры исходной заготовки и их отклонение в исследованном диапазоне практически не влияют на точность готового проката. В ЛПА-2 точность проката существенно повышается с увеличением размеров поперечного сечения заготовки.

Для обеспечения высокой точности профилей крупных сечений (диаметром 40 мм и более), прокатываемых в ЛПА-1, необходим индукционный подогрев заготовок после машины стыковой сварки. При производстве профилей малых сечений (диаметром 5,5-12 мм) из заготовок с температурой 1200 °С расчеты не показали необходимости индукционного подогрева заготовок после машины стыковой сварки. Однако, с учетом влияния неучтенных в расчете факторов (износ валков и точность их установки, колебание межклетевых натяжений), применение индукционного подогрева также целесообразно, а при пониженной температуре заготовок (1100-1000⁰°С) - обязательно.

1. Бадюк С. И. Аналитические исследования влияния температуры и размера сечения заготовок на параметры прокатки в сортовых литейно-прокатных агрегатах / Бадюк С. И. Воробей С. А. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. - №4. – С. 62-65.
2. Хогг Д. Преимущества и современные решения процесса бесконечной прокатки катанки / Хогг Д. // *Сталь*. – 2004. – № 8. – С. 45-47.
3. Жадан В.Т. Аналитическое определение отклонений размеров сортовых профилей при различных возмущениях. Сообщение 1 / Жадан В.Т., Берковский В.С., Чередников В.А. // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – 1977. – № 1. – С. 93-95.
4. Жадан В.Т. Аналитическое определение отклонений размеров сортовых профилей при различных возмущениях. Сообщение 2 / Жадан В.Т., Берковский В.С., Чередников В.А. // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – 1977. – № 3. – С. 90-92.

5. Горлова А.А. Тенденции создания новых сортовых клетей / Горлова А.А. // Неделя металлов в Москве: сб. тр. конф. – М. : Информация – XXI век, 2005. – С. 207-212.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук С.А.Воробьем*

С.І.Бадюк

Аналітичні дослідження впливу технологічних і конструктивних параметрів сортового ливарно-прокатних агрегатів на точність готового прокату

Наведено результати аналітичних досліджень щодо умов формування точності геометричних розмірів сортового прокату в лініях ЛПА, схеми з суміщенням багатострумкової МБЛЗ і прокатного стану зі стиковим зварюванням заготовок перед входом у стан, схеми прямого суміщенням розливання і прокатки. Показано, що точність готового прокату, виробленого на обох схемах ЛПА, в цілому близька, проте умови формування геометричних розмірів поперечного перерізу прокату трохи відрізняються. Для схеми ЛПА з суміщенням багатострумкової МБЛЗ і прокатного стану зі стиковим зварюванням заготовок перед входом у стан зварюванням показана необхідність індукційного підігріву заготовок після машини стикового зварювання.