

Скобло Т.С.,
Автухов А.К.,
Сидашенко А.И.,
Белкин Е.Л.,
Цыганкова И.В.,
Харьковский национальный
технический университет
сельского хозяйства
имени П.Василенка,
г. Харьков, Украина

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОТЛИВОК
ЛИСТОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

УДК 621.746.55.:621.771.07

Выполнен анализ скорости кристаллизации в различных зонах отливки двухслойных хромоникелевых валков, полученных центробежным способом. Расчетами показано, что повышение скорости кристаллизации металла рабочего слоя способствует формированию значительных остаточных напряжений в двухслойных валках из хромоникелевых чугунов.

Ключевые слова: прокатные валки, скорость кристаллизации, рабочий слой, остаточные напряжения.

Актуальность проблемы. В клетях непрерывных и полунепрерывных широкополосных, средне и толстолистовых, а также – дрессировочных широкого применения находят двухслойные валки исполнений ЛПХНд и ЛПХНМд [1]. Повышение производительности прокатных станков при одновременном повышении требований к качеству проката (точность геометрических размеров, отделка продукции) выдвигает все более высокие требования к качеству прокатных валков и увеличению срока их службы [2].

В последние годы при производстве таких валков широкое применение нашел метод центробежного литья.

Применение такого метода позволяет экономить легированный металл рабочего слоя, а также использовать для него менее технологичные легированные сплавы.

Важным в повышении эксплуатационной стойкости двухслойных хромоникелевых валков, изготовленных методом центробежного литья является обеспечение получения рабочего валков с максимальной твердостью, дисперсностью фаз и минимальным уровнем остаточных напряжений, который характеризуется величиной коэрцитивной силы [3].

Цель работы. Цель работы – анализ влияния условий кристаллизации отливок на развитие напряжений в различных зонах отливки двухслойных хромоникелевых валков.

Результаты исследований. При выполнении работы оценивали скорость кристаллизации и распределение остаточных напряжений возникающих при литье центробежным методом двухслойных валков диаметром 675мм для стана 1700.

Из графических изображений расчетных факторов, характеризующих скорость охлаждения различных зон отливок валков (рис. 1) и результатов исследований (табл.1), представленных в работе [4] видно, что большинство из них, зависит от температуры нагрева металлической формы, температуры окружающей среды и толщины металлической формы.

Анализ пятнадцати функций, представленных в таблице, не дает четкого представления о том, какие из них оказывают наибольшее влияние на условия кристаллизации отливок и формирование в них напряжений.

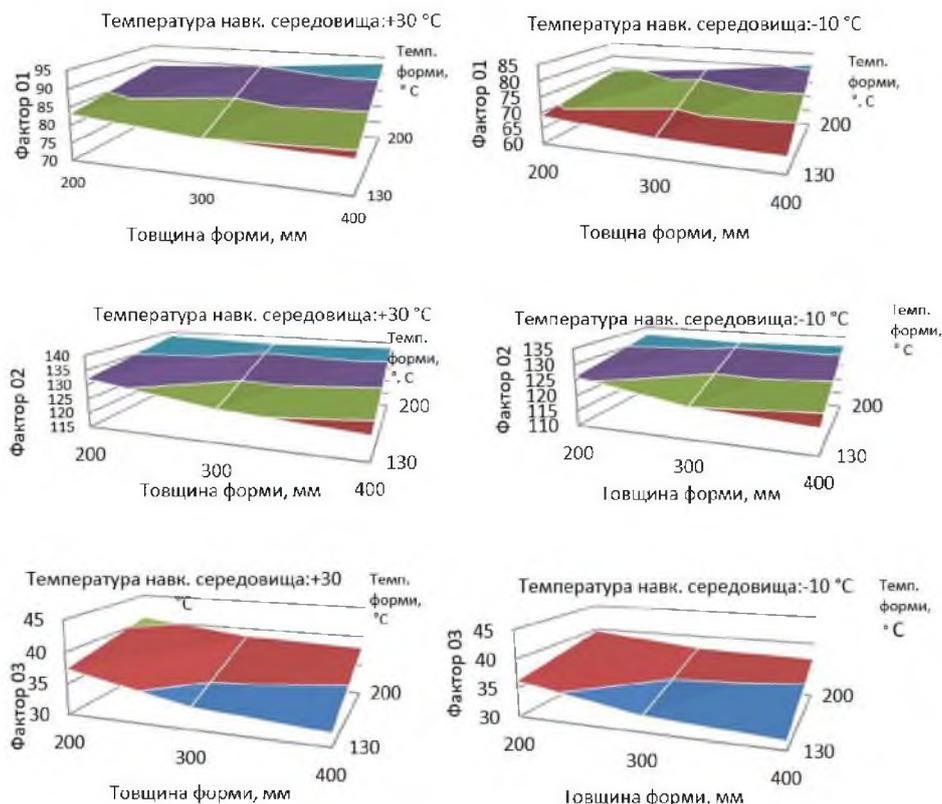


Рис. 1 – Расчетные характеристики факторов, характеризующих скорость охлаждения различных зон отливок валков: фактор 01 – температура внутренней части кокиля через 72 ч; фактор 02 – температура наружной части отливки через 72 ч; фактор 03 – время достижения 200 °С наружной частью отливки, ч

Таблица 1

Влияние технологических параметров на условия кристаллизации отливок

Значения технологических и расчетных параметров отливки*																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
200	130	30	83	84	132	132	133	48	3.78	3.86	4.23	37.33	3.53	37.43	3.50	37.91	3.53
200	130	-10	69	70	126	126	127	56	3.78	3.86	4.23	36.26	3.28	36.33	3.28	36.81	3.28
200	200	30	88	89	138	138	139	50	4.28	4.36	4.73	40.83	3.65	40.93	3.65	41.41	3.65
200	200	-10	74	75	132	132	133	57	4.28	4.33	4.73	39.61	3.40	39.68	3.40	40.18	3.40
300	130	30	80	81	126	126	127	45	3.66	3.73	4.11	33.43	3.23	33.51	3.23	33.98	3.25
300	130	-10	66	67	120	120	121	53	3.66	3.73	4.11	32.68	3.05	32.78	3.03	33.26	3.05
300	200	30	90	91	137	137	138	46	4.11	4.16	4.53	38.61	3.70	38.68	3.70	39.16	3.73
300	200	-10	77	79	131	131	132	52	4.08	4.16	4.53	37.53	3.48	37.61	3.48	38.11	3.48
400	130	30	79	80	123	124	124	43	3.63	3.71	4.08	32.01	3.08	32.08	3.10	32.85	3.08
400	130	-10	65	67	118	118	119	50	3.63	3.71	4.08	31.46	2.93	31.53	2.93	32.03	2.93
400	200	30	93	96	138	138	139	43	4.06	4.13	4.51	37.96	3.78	38.03	3.80	38.51	3.80
400	200	-10	81	84	132	132	133	48	4.06	4.13	4.51	37.01	3.53	37.08	3.55	37.56	3.55

Примечание: 1 – толщина формы, мм; 2 – температура нагрева формы, °С; 3 – температура окружающей среды, °С; 4 – температура наружной части формы через 72 ч., °С; 5 – температура внутренней части кокиля через 72 ч., °С; 6 – температура наружной части отливки через 72 ч., °С; 7 – температура на глубине 30 мм от наружной частью отливки через 72 ч., °С; 8 – температура центра отливки через 72 ч., °С; 9 – разность температур между наружной части отливки и внутренней частью формы через 72 ч., °С; 10 – время достижения 520°С наружной частью отливки,ч;11 – время достижения 520 °С наружной части отливки минус 30 мм, ч; 12 – время достижения 520 °С в центре отливки,ч; 13 – время достижения 200 °С наружной частью отливки,ч; 14 – разность времени достижения 200 и 190 °С в наружной части отливки,ч;15 – время достижения 200°С от наружной части отливки на глубине 30 мм, ч; 16 – разность времени достижения 200 и 190 °С от наружной части отливки на глубине 30 мм ,ч; 17 – время достижения 200°С в центре отливки, ч;18 – разность времени достижения 200 и 190 °С в центре отливки,ч.

Следует отметить, что скорость кристаллизации в каждой точке отливки определяет уровень остаточных напряжений и основную структуру металла. Она изменяется за счет распада остаточного аустенита, но ее карбидная составляющая, сформированная в начале процесса кристаллизации остается стабильной.

При выполнении работы изучали влияние температуры нагрева металлической формы, температуры окружающей среды и толщины металлической формы на скорость кристаллизации различных зон отливки заготовок валков. Результаты теоретических расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Влияние технологических параметров производства валков
на скорость кристаллизации различных зон отливки**

Параметры кристаллизации*								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
200	200	30	0,3	1,5	83,33	2,85	4,8	51,28
400	200	30	0,3	1,5	83,33	2,85	4,8	51,28
300	200	30	0,3	1,5	83,33	2,85	4,8	51,28
300	130	30	0,3	1,5	95,23	2,85	4,8	55,55
400	130	30	0,3	1,5	95,23	2,85	4,5	55,55
200	130	30	0,3	1,5	95,23	2,85	4,5	55,55
200	130	10	0,3	1,5	95,23	2,85	4,5	55,55
400	130	10	0,3	1,5	95,23	2,85	4,5	55,55
300	130	10	0,3	1,5	95,23	2,85	4,5	55,55
300	200	10	0,3	1,5	83,33	2,85	4,8	51,28
400	200	10	0,3	1,5	83,33	2,85	4,8	51,28
200	200	10	0,3	1,5	83,33	2,85	4,8	51,28

*Примечание: 1 – толщина формы, мм; 2 – температура нагрева формы, °С; 3 – температура окружающей среды, °С; 4 – время прохождения температуры ликвидуса наружной точки отливки, мин; 5 – время прохождения температуры солидуса наружной точки отливки, мин; 6 – скорость кристаллизации наружной точки отливки, °С/мин; 7 – время прохождения температуры ликвидуса на глубине 30 мм от наружной точки отливки, °С/мин; 8 – время прохождения солидуса на глубине 30 мм от наружной точки отливки, °С/мин; 9 – скорость кристаллизации на глубине 30 мм от наружной точки отливки, °С/мин.

Анализ табл. 2 показывает, что на глубине 30 мм скорость кристаллизации намного меньше чем на поверхности, что сопровождается неравномерностью структуры по глубине рабочего слоя.

После полученных расчетных данных может казаться, что должен быть большой коэффициент корреляции между факторами, приведенными в первых трех столбцах, однако, он оказался неожиданно маленьким: не превышал 0.3. Хотя по регрессионным моделям было видно, что зависимость является существенной.

Результаты анализа средних значений скорости кристаллизации чугуна в рабочем слое и по сечению отливки валков представлены в табл.3. Они показывают, что средняя скорость кристаллизации всей отливки (столбец 4) на 39,94 – 41,63 °С /сек. меньше - чем рабочего слоя (столбец 5). Также видно, что при температуре нагрева формы до 130°С, средняя скорость кристаллизации на 5,6% больше, чем при сё нагреве до 200°С.

Более подробную информацию о зависимости средней скорости кристаллизации различных зон отливки от толщины используемой металлической формы, температуры её нагрева и окружающей среды дает регрессионный анализ, результаты которого приведены в табл. 4.

Вторая строка этой таблицы показывает, что с коэффициентом корреляции 1 средняя скорость кристаллизации в рабочем слое определяется только температурой нагрева формы.

И эту зависимость можно выразить как:

$$V_{ns} = 4225.44 - 3.033 \times T_{nk}, \quad (1)$$

где T_{nk} – температура нагрева формы, °С.

**Результаты расчетов средних значений скорости кристаллизации чугуна
в рабочем слое и по сечению валков**

Толщина формы, м	Температура нагрева формы, °С	Температура окружающей среды, °С	Средняя скорость кристаллизации по всему сечению отливки, °С/мин.	Средняя скорость кристаллизации в рабочем слое отливки, °С/мин.
1	2	3	4	5
200	200	30	20,36	60,3
400	200	30	20,36	60,3
300	200	30	20,36	60,3
300	130	30	22,21	63,84
400	130	30	22,21	63,84
200	130	30	22,63	63,84
200	130	-10	22,63	63,84
400	130	-10	22,21	63,84
300	130	-10	22,21	63,84
300	200	-10	20,36	60,3
400	200	-10	20,36	60,3
200	200	-10	20,36	60,3

Таблица 4

Регрессионная модель влияния толщины металлической формы, температуры ее нагрева и окружающей среды на скорость кристаллизации рабочего слоя валков

Зона отливки	Параметры регрессионной модели							
	2	3	4	5	6	7	8	9
По всему сечению	1542.24	0.027	-1.67	0.121	1.10	71.7	1.12	0.99
Рабочий слой	4225.44	0.0	-3.03	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00

Примечание: 2 – свободный член a_0 ; 3 – коэффициент a_1 при факторе 1 (толщина формы); 4 – коэффициент a_2 при факторе 2 (температура нагрева формы); 5 – коэффициент a_3 при факторе 3 (температура окружающей среды) 6 – значимость фактора 1 (толщина формы); 7 – значимость фактора 2 (температура нагрева формы); 8 – значимость фактора 3 (температура окружающей среды); 9 – коэффициент множественной корреляции

В рабочем слое оценена также зависимость среднего квадратичного отклонения от указанных параметров. Но и она имеет точно такой же вид, только со свободным членом равным, 1251.3 и коэффициентом при T_{nk} -3.06.

Знаки у коэффициентов регрессии в первой зависимости +; - ;+ (3-й, 4-й, 5-й столбцы). То есть, с увеличением толщины формы и температуры окружающей среды средняя скорость кристаллизации всей отливки соответственно возрастает и уменьшается при повышении температуры нагрева металлической формы.

Чем меньше коэффициент теплоотдачи от отливки к форме, тем слабее должна быть зависимость от температуры его нагрева. Это связано с тем, что тепловой поток, зависящий от разности температур между отливкой и формой, уменьшается, а скорость кристаллизации понижается, и дополнительно может уже играть роль, как толщина формы, так и температура окружающей среды (толщина все же должна быть более значимой).

На основании выполненных теоретических исследований по определению влияния технологических параметров литья на скорость кристаллизации по специально разработанной программе были рассчитаны графики (рис.2) распределения остаточных напряжений в зависимости от скорости кристаллизации различных зон отливки.

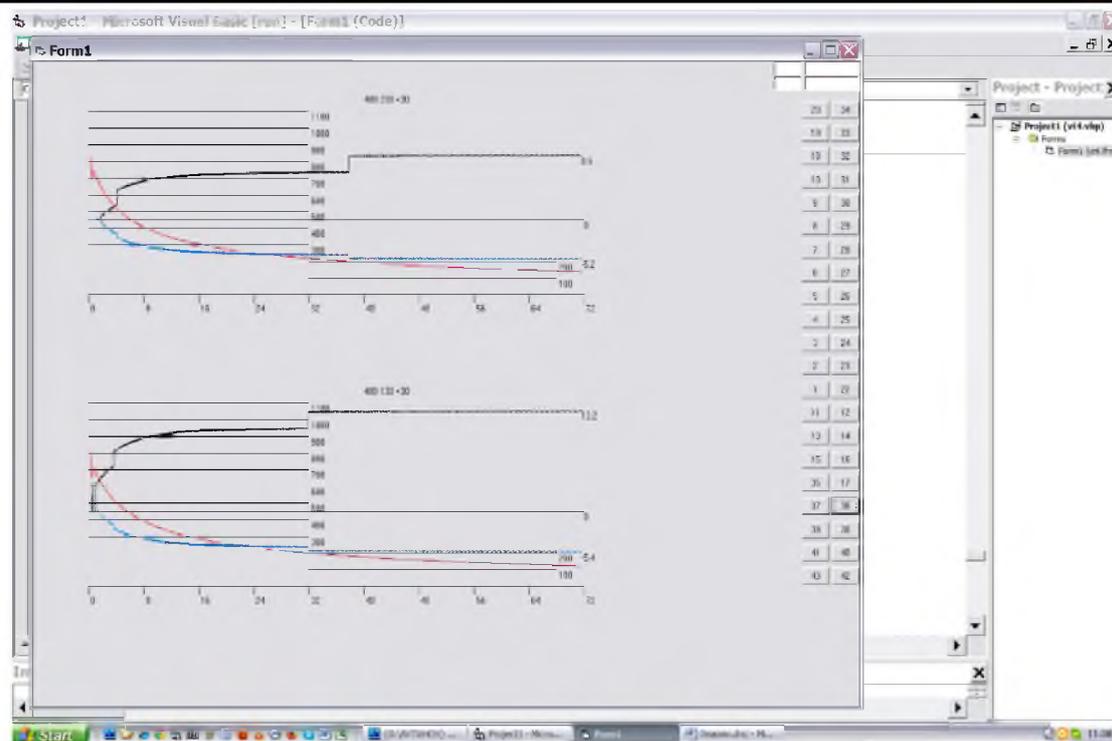


Рис. 2 – Распределение остаточных напряжений в крайних точках отливок валков, отлитых в металлические формы толщиной 400мм, нагретые до 130 и 200°C, при температуре окружающей среды +30°C:
черная линия описывает характер и величину остаточных напряжений в наибольшем радиусе отливки;
синяя линия – характер и величину остаточных напряжений в наименьшем радиусе отливки;
красная линия представляет температурную кривую, соответствующую наибольшему радиусу отливки

Представленные графики показывают, что скорость кристаллизации отливок оказывает существенное влияние на возникновение остаточных напряжений в прокатных валках. При скорости кристаллизации наружной части отливки равной 83,33°C/мин. напряжение на краю отливки ≈ 86 МПа/мм², а при скорости кристаллизации – 95,23°C/мин. напряжение на поверхности отливки достигает ≈ 132 МПа/мм².

Остаточные напряжения внутри отливок, как и скорость кристаллизации, практически одинаковые и находятся в пределах 52 – 54МПа со знаком минус.

Выводы. В результате выполненных исследований установлено, что скорость кристаллизации в каждой точке отливки при их производстве центробежнолитым методом оказывает существенное влияние на формирование остаточных напряжений в рабочем слое вала.

Зависимость скорости кристаллизации от трех наиболее важных параметров (температуры нагрева металлической формы перед заливкой металла рабочего слоя, температуры рабочего слоя и толщины формы) показала следующее: на глубине 30 мм она намного меньше, чем на поверхности, что сопровождается формированием неравномерной структуры по глубине, даже в центробежной отливке.

Выполненные расчеты показали, что средняя скорость кристаллизации всей отливки примерно на 39,94 – 41,63 °C /мин. меньше чем рабочего слоя.

Регрессионным анализом установлено, что средняя скорости кристаллизации в рабочем слое определяется только температурой нагрева формы (чем она больше, тем скорость меньше). В этом случае коэффициент корреляции составляет 1,0.

С увеличением температуры нагрева металлической формы средняя скорость кристаллизации всей отливки уменьшается. Толщина формы и температура окружающей среды незначительно влияют на скорость кристаллизации.

При скорости кристаллизации наружной части отливки равной 83,33°C/мин напряжение на краю отливки ≈ 86 МПа/мм², а при скорости кристаллизации –95,23°C/сек

напряжение на поверхности отливки достигает ≈ 132 МПа/мм².

Остаточные напряжения внутри отливок, как и скорость кристаллизации, практически одинаковые и находятся в пределах 52 – 54МПа со знаком минус.

Литература:

1. Н. А. Будагьянц. Литые прокатные валки / Н.А.Будагьянц, В.Є. Карский – М.: Машиностроение, 1983. 175 с.
2. Производство и применение прокатных валков: справочник / Т. С. Скобло, А. И. Сидашенко, Н. М. Александрова и др.: под ред. Т. С. Скобло. – Х.: ЦД № 1, 2013. – 572 с.
3. Скобло Т.С. Анализ эксплуатационной стойкости двухслойных чугуновых валков /Т.С. Скобло, А.К. Автухов, Р.Г.Соколов // Сталь. – 2015. – №2 – С. 34-37.
4. Скобло Т.С. Оценка влияния параметров отливки двухслойных листопрокатных валков на скорость кристаллизации и распределение остаточных напряжений / Т.С. Скобло, А.К. Автухов, А.И. Сидашенко, Е.Л. Белкин, Н.Н. Пильгуй // Сталь. – 2016. – №10 – С.34-38

Summary

Skoblo T. S., Avtukhov A. K., Sidashenko A.I., Belkin E.L., Tsygankova I.V.
Theoretical evaluation of the conditions of crystallization of castings of sheet-rolled shafts

We analyzed the crystallization rate in different zones of casting of two-layer chromium-nickel rolls which were obtained centrifugal method. The results show that the increase of the crystallization rate of the metal working layer promotes to the formation of significant residual stresses in two-layer nickel-chromium iron-cast rolls.

Keywords: rolling rolls, crystallization rate, working layer, residual stresses

References

1. N. A. Budag'yants. Lityie prokatnyie valki / N. A. Budagyants, V.E. Karskiy – М.: Mashinostroenie, 1983. 175 s.
2. Proizvodstvo i primeneniye prokatnyih valkov: spravochnik / T. S. Skoblo, A. I. Sidashenko, N. M. Aleksandrova i dr.: pod red. T. S. Skoblo. – H.: TsD # 1, 2013. – 572 s.
3. Skoblo T. S. Analiz ekspluatatsionnoy stoykosti dvuhsloynnyih chugunnyih valkov / T.S. Skoblo, A.K. Avtuhov, R.G. Sokolov // Stal. – 2015. – #2 – S. 34-37.
4. Skoblo T. S. Otsenka vliyaniya parametrov otlivki dvuhsloynnyih listoprokatnyih valkov na skorost kristallizatsii i raspredeleniye ostatochnyih napryazheniy / T.S. Skoblo, A.K. Avtuhov, A.I. Sidashenko, E.L. Belkin, N.N. Pilguy // Stal. – 2016. – #10 – S.34-38