

УДК 621.923

© Сергеев А. С.¹, Андилахай А. А.²

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Приведены аналитические зависимости для определения высотных параметров шероховатости поверхности при использовании метода доводки связанным абразивом с однослойным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента. Закономерности формирования шероховатости поверхности аналитически описаны с учетом вероятностного участия зерен в резании и с учетом их износа. Показано, что с переходом от конусообразной формы рабочей части режущих зерен к сферической форме (за счет износа зерен) высотные параметры шероховатости поверхности R_a и R_{max} уменьшаются. При этом отношение R_{max}/R_a , наоборот, увеличивается в связи с более интенсивным уменьшением параметра R_a по сравнению с уменьшением параметра R_{max} . Исходя из этого, определены условия уменьшения параметров шероховатости поверхности, состоящие в уменьшении зернистости абразива и увеличении количества одновременно работающих зерен. Полученные теоретические решения подтверждены экспериментально. На этой основе разработана эффективная технология внутреннего шлифования отверстий в цилиндрах мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С зернистостью F150 – F180. Применение этой технологии позволяет существенно уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a (до значения 0,04 мкм и менее) без увеличения трудоемкости и уменьшения производительности обработки.

Двойной положительный эффект достигается, прежде всего, благодаря тому, что обработочные риски последующей обработки в рассматриваемой технологии направлены под прямым углом к обработочным рискам, полученным на предыдущей операции, при этом скорость резания (шлифования) значительно превышает скорость резания (шлифования брусками), например, при хонинговании. Кроме того, дополнительный положительный эффект состоит в том, что обработочные риски, остающиеся после шлифования мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка совпадают по направлению с движением поршня пневмо- гидроцилиндра, что обеспечивает сохранность поршневых колец или других уплотнений поршня.

Ключевые слова: доводка свободным абразивом, износ зерен, рабочая поверхность инструмента, внутреннее шлифование, мягкий войлочный круг

Постановка проблемы. Шероховатость поверхности является одной из основных характеристик деталей машин, определяющей их эксплуатационные свойства. Поэтому при изготовлении деталей машин необходимо обеспечить минимально возможную шероховатость поверхности, что позволит одновременно повысить показатели качества и точности обработки.

Традиционно основным технологическим методом обеспечения высоких показателей шероховатости обрабатываемой поверхности является абразивная обработка – методы обработки связанным и свободным абразивами. Однако на практике их технологические возможности используются не в полной мере. Это связано с отсутствием до настоящего

¹аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

²д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

Машинобудування і зварювальне виробництво

время научно обоснованной методики выбора оптимальных условий абразивной обработки с учетом требований к шероховатости обрабатываемой поверхности. Поэтому настоящая работа посвящена теоретическому определению возможностей уменьшения шероховатости поверхности применительно к методу обработки связанным абразивом с учетом одновысотного (вероятностного) расположения режущих зерен на рабочей поверхности инструмента, а также с учетом износа зерен в процессе резания. Такой подход позволит достаточно просто установить основные закономерности формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке и выявить новые резервы ее уменьшения.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1-5] предложены теоретические подходы к расчету параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке с позиции вероятностного участия абразивных зерен в процессе резания. Это позволило оценить технологические возможности различных методов абразивной обработки с целью уменьшения шероховатости поверхности. Однако в предложенных расчетных схемах не показано с единых позиций влияние различных форм режущей части абразивных зерен на закономерности формирования шероховатости поверхности. В особой мере это относится к изменению формы режущего зерна в связи с его износом в процессе обработки. В результате имеет место переход от конусообразной формы режущего зерна к сферической форме, что соответствует реальным условиям абразивной обработки. Поэтому важно аналитически учесть данную закономерность при аналитическом описании параметров шероховатости поверхности и определении условий их уменьшения.

Цель работы – теоретическое обоснование технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке для различных форм режущей части абразивных зерен, в том числе в связи с их износом в процессе резания.

Изложение основного материала. Для достижения поставленной цели необходимо воспользоваться результатами теоретических исследований, приведенных в работе [1], где аналитически описана вероятностная функция $\Phi(y)$, определяющая вероятность неснятого материала (в виде микронеровностей) с поверхности образца (рис. 1):

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

где γ – половина угла при вершине конусообразной формы режущего зерна;

n – количество абразивных зерен, принимающих участие в процессе образования шероховатости поверхности;

B – ширина образца, м;

y – координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

Вероятностная функция $\Phi(y)$ соответствует классической относительной опорной длине микропрофиля обработанной поверхности [2].

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$F_1 = \int_{x_1}^a [\Phi_0 - \Phi(y)] \cdot dy = \Phi_0 \cdot (a - x_1) - \int_{x_1}^a \Phi(y) \cdot dy; \quad (3)$$

$$F_2 = \int_a^{\epsilon} \Phi(y) \cdot dy, \quad (4)$$

где $\Phi_0 = \Phi(y = x_1)$ – значение функции $\Phi(y)$ при $y = x_1$;

ϵ – высота вершин неизношенных зерен над уровнем рабочей поверхности абразивного инструмента, м.

Сравнивая зависимости (3) и (4), получено:

$$\Phi_0 \cdot (a - x_1) = \int_{x_1}^{\epsilon} \Phi(y) \cdot dy. \quad (5)$$

Для функции $\Phi(y)$, описываемой зависимостью (1), после преобразований зависимости (5) имеем:

$$\frac{a}{\epsilon} = \frac{x_1}{\epsilon} + \frac{1}{N} \cdot \left[1 - e^{-N \cdot \left(1 - \frac{x_1}{\epsilon}\right)} \right], \quad (6)$$

где $N = \frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot \epsilon}{B}$.

Величина N определяет отношение длины удаленного режущими зернами материала на уровне $y = \epsilon$ (при равномерном расположении проекций зерен на обрабатываемой поверхности образца) к ширине образца B (рис. 1).

Параметр шероховатости поверхности R_a , исходя из зависимости (2), определяется:

$$0,5 \cdot R_a = F_1 = \int_{x_1}^a [\Phi_0 - \Phi(y)] \cdot dy = \frac{1}{\alpha} \cdot \left[e^{-\alpha \cdot x_1} \cdot (\alpha \cdot a - \alpha \cdot x_1) + (e^{-\alpha \cdot a} - e^{-\alpha \cdot x_1}) \right], \quad (7)$$

где $\alpha = \frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}{B} = \frac{N}{\epsilon}$.

С учетом отношения $\alpha = N / \epsilon$ имеем:

$$\frac{R_a}{\epsilon} = 2 \cdot \left[e^{-N \cdot \frac{x_1}{\epsilon}} \cdot \left(\frac{a}{\epsilon} - \frac{x_1}{\epsilon} \right) + \frac{1}{N} \cdot \left(e^{-N \cdot \frac{a}{\epsilon}} - e^{-N \cdot \frac{x_1}{\epsilon}} \right) \right]. \quad (8)$$

Для установления отношения a / R_{max} необходимо отношение a / ϵ представить в виде:

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\frac{a}{\vartheta} = \frac{a}{R_{max}} \cdot \frac{R_{max}}{\vartheta}. \quad (9)$$

Преобразуя выражение $\vartheta = x_1 + R_{max}$ к виду $1 = \frac{x_1}{\vartheta} + \frac{R_{max}}{\vartheta}$, получено:

$$\frac{a}{\vartheta} = \frac{a}{R_{max}} \cdot \left(1 - \frac{x_1}{\vartheta}\right). \quad (10)$$

Тогда зависимость (6) запишется:

$$\frac{a}{R_{max}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{x_1}{\vartheta}\right)} \cdot \left\{ \frac{x_1}{\vartheta} + \frac{1}{N} \cdot \left[1 - e^{-N \cdot \left(1 - \frac{x_1}{\vartheta}\right)}\right] \right\}. \quad (11)$$

Аналогично можно установить отношение R_a/R_{max} , представляя в зависимости (8):

$$\frac{R_a}{\vartheta} = \frac{R_a}{R_{max}} \cdot \left(1 - \frac{x_1}{\vartheta}\right). \quad (12)$$

В результате зависимость (8) выразится:

$$\frac{R_a}{R_{max}} = \frac{2}{\left(1 - \frac{x_1}{\vartheta}\right)} \cdot \left[e^{-N \cdot \frac{x_1}{\vartheta}} \cdot \left(\frac{a}{\vartheta} - \frac{x_1}{\vartheta}\right) + \frac{1}{N} \cdot \left(e^{-N \cdot \frac{a}{\vartheta}} - e^{-N \cdot \frac{x_1}{\vartheta}} \right) \right]. \quad (13)$$

Таким образом, получены расчетные зависимости для определения отношений высотных параметров шероховатости поверхности a/R_{max} и R_a/R_{max} . В табл. 1 приведены расчетные значения отношений a/R_{max} , R_a/R_{max} и R_{max}/R_a для случаев $x_1 = 0$ и $x_1/\vartheta = 0,5$.

Как видно, с увеличением длины площадки износа на режущих зернах x_1 отношение R_a/R_{max} уменьшается, а отношение R_{max}/R_a , наоборот, увеличивается. Так, при $x_1/\vartheta = 0,5$ отношение R_{max}/R_a принимает значения, значительно превышающие экспериментально установленные значения при шлифовании ($R_{max}/R_a = 5 \dots 10$ [2]), и соответствующие экспериментально установленным значениям при абразивном полировании ($R_{max}/R_a = 30$ [6]). Этим показано, что в случае одновысотного выступания зерен с площадками износа на них, но без учета поперечной подачи ($S_{pad} = 0$), отношение R_a/R_{max} существенно уменьшается, а отношение R_{max}/R_a , наоборот, увеличивается, принимая значения, несвойственные процессу шлифования. Это происходит, когда имеет место явно выраженное разновысотное выступание режущих зерен над уровнем связки шлифовального круга.

Таблица 1 – Расчетные значения отношений a/R_{max} , R_a/R_{max} и R_{max}/R_a

Машинобудування і зварювальне виробництво

N		1	2	3	4	5
$x_1 = 0$	a / R_{max}	0,632	0,432	0,317	0,245	0,199
	R_a / R_{max}	0,33	0,285	0,224	0,178	0,145
	R_{max} / R_a	3,03	3,51	4,46	5,62	6,9
$x_1 / \vartheta = 0,5$	a / R_{max}	1,786	1,632	1,518	1,432	1,368
	R_a / R_{max}	0,1686	0,119	0,07	0,0386	0,02
	R_{max} / R_a	5,93	8,405	14,285	25,905	50

С увеличением величины N (т. е. с увеличением количества работающих абразивных зерен) отношение R_{max} / R_a увеличивается, особенно при абразивном полировании зернами, имеющими на вершинах площадки износа (рис. 3).

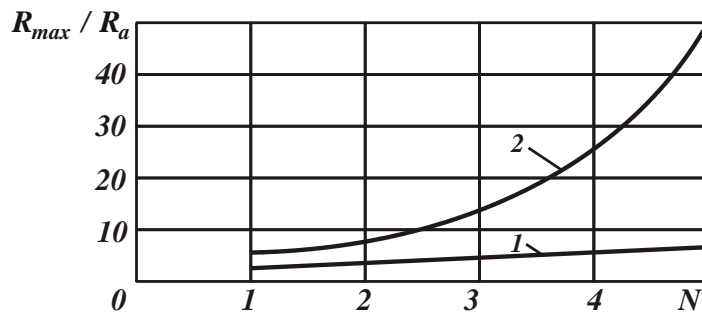


Рисунок 3 – Зависимость отношения R_{max} / R_a от величины N :

1 – $x_1 = 0$; 2 – $x_1 / \vartheta = 0,5$

Параметры шероховатости поверхности a , R_a и R_{max} определяются зависимостями:

$$a = x_1 + \frac{\vartheta}{N} \cdot \left[1 - e^{-N \cdot \left(1 - \frac{x_1}{\vartheta}\right)} \right]; \tag{14}$$

$$R_a = 2 \cdot \left[e^{-N \cdot \frac{x_1}{\vartheta}} \cdot (a - x_1) + \frac{\vartheta}{N} \cdot \left(e^{-N \cdot \frac{a}{\vartheta}} - e^{-N \cdot \frac{x_1}{\vartheta}} \right) \right]; \tag{15}$$

$$R_{max} = \vartheta \cdot \left(1 - \frac{x_1}{\vartheta} \right). \tag{16}$$

В табл. 2 приведены расчетные значения параметров шероховатости поверхности a , R_a и R_{max} для случаев $x_1 = 0$ и $x_1 = 5$ мкм при $\vartheta = 10$ мкм. Как видно, с увеличением величины N параметр R_a уменьшается (рис. 4), а параметр R_{max} остается неизменным. С увеличением величины линейного износа режущих зерен x_1 параметры R_a и R_{max}

Машинобудування і зварювальне виробництво

уменьшаются, причем, параметр R_a – в значительных пределах, особенно с увеличением величины N .

Таблица 2 – Расчетные значения параметров шероховатости поверхности a , R_a и R_{max} для $v = 10$ мкм

N		1	2	3	4	5
$x_1 = 0$	a , мкм	6,32	4,32	3,17	2,45	1,99
	R_a , мкм	3,3	2,85	2,24	1,78	1,45
	R_{max} , мкм	10				
$x_1 = 5$ мкм	a , мкм	8,93	8,16	7,59	7,16	6,84
	R_a , мкм	0,843	0,595	0,35	0,193	0,1
	R_{max} , мкм	5				

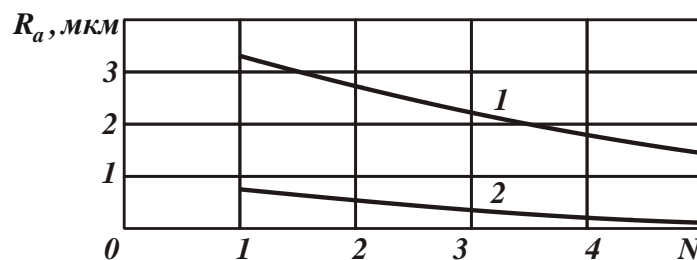


Рисунок 4 – Зависимость параметра шероховатости поверхности R_a от величины N : 1 – $x_1 = 0$; 2 – $x_1 = 5$ мкм

Следовательно, переход от конусообразной формы режущего зерна (которая реализуется при $x_1 = 0$) к трапецидальной (сферической) форме, обусловленной линейным износом зерна (например, $x_1 = 5$ мкм, табл. 2), позволяет существенно уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a . При $N \geq 5$ достигаются значения $R_a = 0,1$ мкм и менее, что, как известно, требуется для изготовления высокоточных деталей машин [7].

Исходя из зависимости (15), основными условиями уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a являются уменьшение величины v (т.е. зернистости абразива) и увеличение величины линейного износа режущих зерен x_1 и величины N , определяющей количество одновременно работающих зерен.

Справедливость полученных зависимостей подтверждается результатами экспериментов, проведенных с использованием шлифовальной головки, оснащенной сменными войлочными кругами с однослойным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности. Для этого на рабочую поверхность войлочных кругов наносили жидкое стекло и порошок абразив. Время высыхания жидкого стекла при температуре $18 - 20$ °С - 10 мин. Обработку проводили кругами с наклеенным абразивным слоем карбида кремния зеленого размером зерна F150, F160 и F180. В результате получили шероховатость поверхности соответственно с зернистостью F150 - $R_{max} = 1,6$, $R_a = 0,4$; с зернистостью F160 - $R_{max} = 0,9$; $R_a = 0,2$; с зернистостью F180 - $R_{max} = 0,6$, $R_a = 0,1$, мкм.

ВЫВОДЫ

Приведены аналитические зависимости для определения высотных параметров шероховатости поверхности при использовании метода доводки связанным абразивом с однослойным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента. Закономерности формирования шероховатости поверхности аналитически описаны с учетом вероятностного участия зерен в резании и с учетом их износа. Показано, что с переходом от конусообразной формы рабочей части режущих зерен к сферической форме (за счет износа зерен) высотные параметры шероховатости поверхности R_a и R_{max} уменьшаются. При этом отношение R_{max}/R_a , наоборот, увеличивается в связи с более интенсивным уменьшением параметра R_a по сравнению с уменьшением параметра R_{max} . Исходя из этого, определены условия уменьшения параметров шероховатости поверхности, состоящие в уменьшении зернистости абразива и увеличении количества одновременно работающих зерен. Полученные теоретические решения подтверждены экспериментально. На этой основе разработана эффективная технология внутреннего шлифования отверстий в цилиндрах мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С F150 – F180. Применение этой технологии позволяет существенно уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a (до значения 0,1 мкм и менее) без увеличения трудоемкости и уменьшения производительности обработки. Важнейшими факторами, обеспечивающими получение положительного эффекта являются: - изменение направления обработочных рисков на поперечное; - значительное увеличение количества одновременно работающих абразивных зерен в сравнении с абразивными кругами на твердой связке.

Список использованных источников:

1. *Новіков, Ф. В.* Основи обробки металевих виробів з оптичними властивостями : монографія / *Ф. В. Новіков, В. Г. Шкуруній.* – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 388 с.
2. *Рыжов, Э. В.* Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / *Э. В. Рыжов.* – Киев : Наукова думка, 1984. – 272 с.
3. *Королев, А. В.* Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / *А. В. Королев.* – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 212 с.
4. *Новоселов, Ю. К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / *Ю. К. Новоселов.* – Саратов, 1979. – 232 с.
5. *Евсеев, Д. Г.* Физические основы процесса шлифования / *Д. Г. Евсеев, А. И. Сальников.* – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1978. – 128 с.
6. *Шкуруній, В. Г.* Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / *Шкуруній Валентин Григорович.* – Одеса, 2006. – 21 с.
7. *Рябенков, И. А.* Закономерности формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке и условия ее уменьшения / *И. А. Рябенков, Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай* // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2016. – Вип. 32. – С. 144–150. – (Серія : Технічні науки)

Сергєєв О. С., Андїлахай О. О.

**ТЕОРЕТИЧНЕ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ
УМОВ ЗМЕНШЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ
ПРИ АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ**

Наведено аналітичні залежності для визначення висотних параметрів шорсткості поверхні при використанні методу доведення зв'язаним абразивом з одношаровим розташуванням абразивних зерен на робочій поверхні інструменту. Закономірності формування шорсткості поверхні аналітично описані з урахуванням імовірнісного участі зерен в різанні і з урахуванням їх зносу. Показано, що з переходом від конусоподібної форми робочої частини ріжучих зерен до сферичної форми (за рахунок зносу зерен) висотні параметри шорсткості поверхні R_a і R_{max} зменшуються. При цьому відношення R_{max} / R_a , навпаки, збільшується в зв'язку з більш інтенсивним зменшенням параметра R_a в порівнянні зі зменшенням параметра R_{max} . Виходячи з цього, визначені умови зменшення параметрів шорсткості поверхні, що складаються в зменшенні зернистості абразиву і збільшенні кількості одночасно працюючих зерен. Отримані теоретичні рішення підтверджені експериментально. На цій основі розроблена ефективна технологія внутрішнього шліфування отворів в циліндрах м'яким повстяним (фетровим) колом з наклеєним шаром абразивного порошку 63С зернистістю F150 – F180. Застосування цієї технології дозволяє істотно зменшити параметр шорсткості поверхні R_a (до значення 0,1 мкм і менше) без збільшення трудомісткості і зменшення продуктивності обробки.

Подвійний позитивний ефект досягається, перш за все, завдяки тому, що оброблювальні ризики подальшої обробки в розглянутій технології спрямовані під прямим кутом до оброблювальних рисок, отриманих на попередній операції, при цьому швидкість різання (шліфування) значно перевищує швидкість різання (шліфування брусками), наприклад, при хонінгуванні. Крім того, додатковий позитивний ефект полягає в тому, що оброблювальні риси, що залишаються після шліфування м'яким повстяним (фетровим) колом з наклеєним шаром абразивного порошку збігаються за напрямком з рухом поршня пневмо-гідроциліндра, що забезпечує збереження поршневих кілець або інших ущільнень поршня.

Ключові слова: доведення вільним абразивом, знос зерен, робоча поверхня інструмента, внутрішнє шліфування, м'який повстяний круг

Serhieiev O., Andilahay O.

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL DEFINITION CONDITIONAL
REDUCTION OF SURFACE REDUCING IN ABRASIVE PROCESSING**

Analytical dependences for determination of height parameters of surface roughness are presented when using the method of proving bound abrasive with single-layer arrangement of abrasive grains on the working surface of the tool. Patterns of formation of surface roughness are

described analytically taking into account the probable participation of grains in cutting and taking into account their wear. It is shown that with the transition from the conical shape of the working part of the cutting grains to the spherical shape (due to wear of the grains), the height parameters of the surface roughness R_a and R_{max} decrease. The ratio, on the contrary R_{max} / R_a , increases due to a more intense decrease of the parameter compared to the decrease of the parameter R_{max} . On this basis, certain conditions for reducing the surface roughness parameters, which consist in reducing the grain size of the abrasive and increasing the number of simultaneously working grains. The obtained theoretical solutions are confirmed experimentally. On this basis, an effective technology of internal grinding of holes in cylinders with a soft felt (felt) wheel with a pasted layer of abrasive powder 63C grit F150 – F180 is developed. The application of this technology can significantly reduce the surface roughness parameter R_a (to a value of 0.1 microns and less) without increasing the complexity and reducing processing performance.

The double positive effect is achieved, first of all, due to the fact that the processing risks of further processing in the considered technology are directed at a right angle to the processing risks obtained in the previous operation, with the cutting speed (grinding) is much higher than the cutting speed (grinding), eg grinding, , when honing. In addition, the additional positive effect is that the machining risks remaining after grinding with a soft felt (felt) wheel with a bonded layer of abrasive powder coincide in the direction with the movement of the piston of the pneumatic cylinder, which ensures the preservation of the piston rings or other seals of the piston.

Keywords: free abrasive finishing, grain wear, tool surface, internal grinding, soft felt circle

Рецензент: доктор техн. наук, проф. В. В. Суглобов
Статья поступила 22.10.2019

УДК 669-412:004.3'124.001.57

Кананович С. І., Дордуров А. В., Кравченко В. П.

ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ТИПІВ РОЗПОДІЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОВІДАЧІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЛИВКУ У ЗОНІ ВТОРИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ЗАГОТІВОК

Розглядається математична модель охолодження зливка в зоні вторинного охолодження машини безперервного розливу заготовок в стаціонарному режимі розливання, без зміни швидкості по ходу охолодження. В основу математичної моделі покладено диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності в умовах фазових перетворень (кристалізації металу) з відповідними початковими і граничними умовами. Програмна реалізація моделі потребує конкретних значень початкових і граничних умов. При цьому важливе значення мають значення коефіцієнту тепловіддачі і його розподілення по довжині зливку у зоні вторинного охолодження, а також значення швидкості розливу та витрат охолоджувачів. При вирішенні рівняння теплопровідності були прийняті граничні умови третього роду з відповідними значеннями коефіцієнтів теплопровідності і тепловіддачі.

В моделі були зроблені припущення, що впливають із фізичних особливостей поставленої задачі :

- температурний режим вважаємо сталим;
- швидкість руху зливка постійна;
- теплообмін уздовж зливка не відбувається через малі зміни температури вздовж зливка;
- основний теплообмін йде в площині поперечного січення зливка;