

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.793.71:669.248.7

Вдовин К.Н., Дубский Г.А., Астапов Е.Н., Нефедьев А.А.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕТОНАЦИОННО НАПЫЛЕННОГО НИКЕЛЯ НА МЕДНЫЕ ПЛАСТИНЫ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

При производстве кристаллизаторов для сортовых, блюмовых и слябовых МНЛЗ используют листовую медь, из которой изготавливают плиты необходимых размеров с последующей доработкой их рабочих поверхностей посредством нанесения на них выбранным методом защитных покрытий. Покрытия могут быть как однокомпонентные, так и многокомпонентные. Так, фирма EGON EVERTZ использует гальваническое покрытие из никеля. Кристаллизатор из медных плит с никелевым покрытием, по утверждению фирмы-производителя EGON EVERTZ, выдержал 1880 плавов на 2-ручьевого МНЛЗ с объемом ковша 306 т. Это значит, что через один кристаллизатор прошло 287640 т стали. При всех достоинствах предлагаемого фирмой EGON EVERTZ метода построения кристаллизаторов он имеет и существенные недостатки:

- очень сложная и дорогая технология подготовки поверхности меди под покрытие – в основном химическая технология;

- поскольку нанесение покрытия гальваническое, то оно без солей и кислот невозможно;

- необходимость электроизоляции свободных от покрытия поверхностей листов меди, что в сильно агрессивных средах сделать технологически трудно и дорого.

В настоящее время все чаще обращаются к газотермическим методам нанесения покрытий. Одной из разновидностей этого метода является детонационно-газовый метод напыления, который считается наиболее перспективным при получении относительно толстых и механически прочных покрытий. Основным его достоинством является очень высокая скорость напыляемых частиц, достигающая 800...1300 м/с. Такой скорости достаточно, чтобы посредством кинетико-динамических процессов взаимодействия частица – основа химически активировать напыляемую поверхность, а значит, организовывать хорошую адгезию и когезию напыляемых частиц, которая может достигать 100 МПа [1].

Для полученных покрытий, которые будут в процессе эксплуатации переносить непрерывные высокие механические и тепловые нагрузки, а также иногда тепловые удары, необходимы точные сведения об изменении всех теплофизических свойств напыленных слоев от температуры.

Нами были проведены исследования теплофизических свойств напыленного по заданной технологии никеля на медь. Образцы изготавливались и поставлялись фирмой ЗАО «Уралинжиниринг». Измерения температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости проводились на экспериментальной установке, описанной в работе [2].

1. Никелевый детонационно-газовонапыленный и литой отожженный образец

Физические свойства образцов

<u>1 образец</u> (литой, отожженный при 750°С в течение 6 ч)	
Чистота	99,92%
Плотность	$\rho = 8890$ кг/м.
Скорость звука продольная	$v_3 = 5700$ м/с.
Модуль Юнга	$E_{np} = 2,89 \cdot 10^{11}$ Н/м ² .
<u>2 образец</u> (детонационно-газовонапыленный)	
Чистота	98,8%
Плотность	$\rho = 8630$ кг/м.
Скорость звука продольная	$v_3 = 4900$ м/с.
Модуль Юнга	$E_{np} = 2,07 \cdot 10^{11}$ Н/м ² .

Образцы имели цилиндрическую форму. Размеры каждого образца: диаметр – 16 мм, высота – 10 мм. Перед загрузкой образца в рабочую вакуумную камеру экспериментальной установки были изготовлены шлифы торцевой поверхности этих образцов. Снимки шлифов детонационно-газовонапыленного никеля и массивного никеля представлены на **рис. 1** и **2**.

Из сравнения структур, представленных на **рис. 1** и **2**, следует, что структура детонационно-газовонапыленного никеля представляется в виде чередующихся слоев. Все слои составлены из разновеликих блоков. Кроме того, спайность ме-

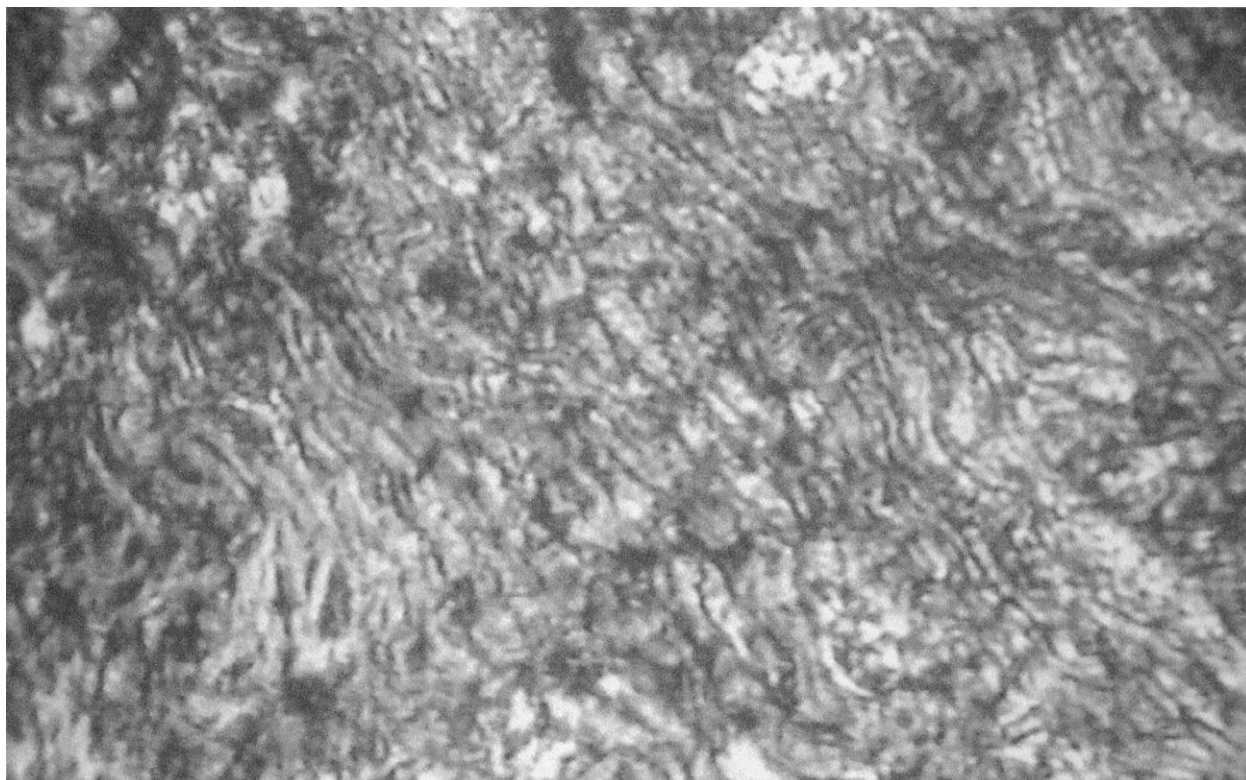


Рис. 1. Картина шлифа никелевого детонационно-газово-напыленного образца, $\times 200$

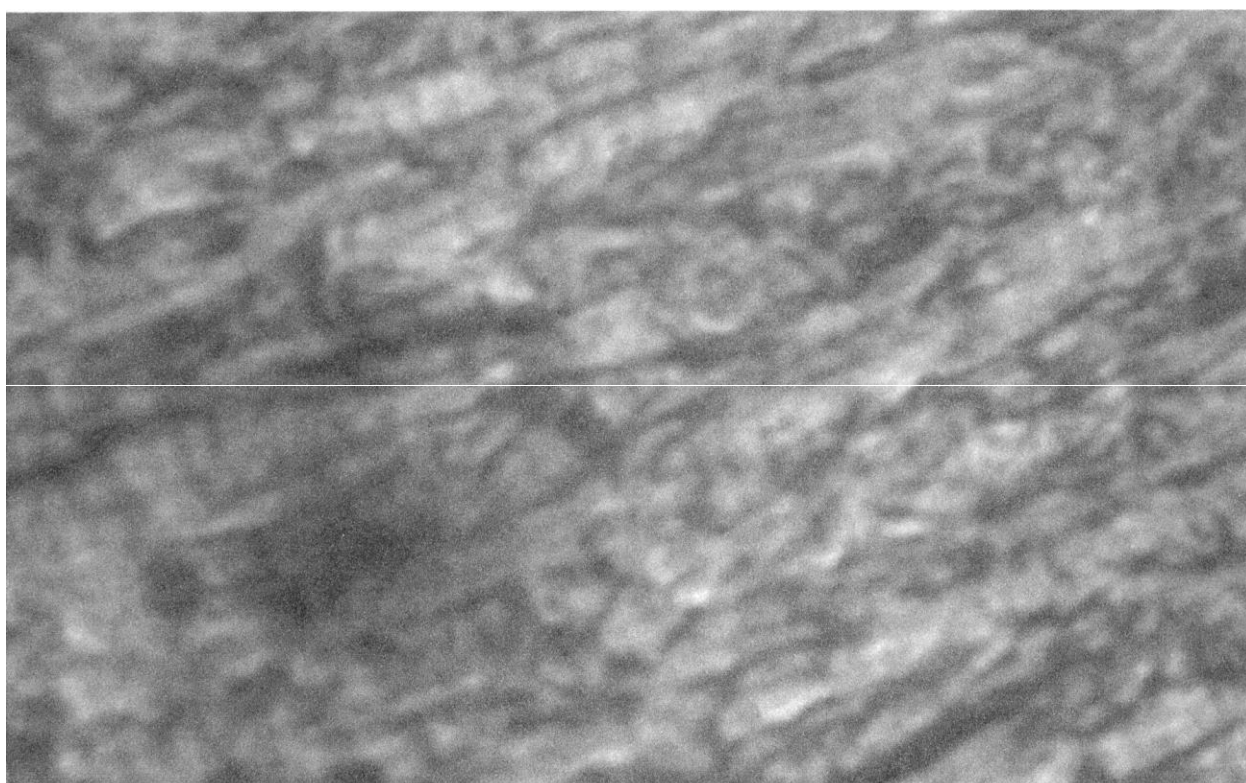


Рис. 2. Картина шлифа литого и отожженного никелевого образца, $\times 400$

жду слоями и блоками, образующими слой, не является стопроцентной (оценка проводилась по толщине и цвету границ спайности). О качестве спайности слоев и блоков в каждом слое, т.е. пористости образца, говорят исследованные физические свойства: плотность, скорость звука и продольный модуль Юнга, которые отличаются от соответствующих физических свойств литого отожженного никеля: пористость напыленного никеля составляет примерно 3%.

2. Результаты исследования теплофизических свойств детонационно-газовонапыленного и литого никеля

Измеренные температурные зависимости температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости детонационно-газовонапыленного и литого отожженного никеля представлены на рис. 3–5.

Из качественного сравнения зависимостей, представленных на рис. 3–5, можно сделать следующие выводы:

1. По абсолютной величине температуропроводности и теплопроводности напыленного никеля гораздо ниже, чем у литого отожженного никеля.

2. Характер изменения $a(T)$ и $\lambda(T)$ от температуры у напыленного и литого отожженного никеля примерно одинаков, хотя есть некоторые различия, особенно для $a(T)$ после Θ_k , а для $\lambda(T)$ до Θ_k .

3. При превышении температуры Кюри ($T = \Theta_k$) температуропроводность, теплопроводность и теплоёмкость изменяют свой характер поведения. Это связано с тем, что образцы из ферромагнитного состояния переходят в парамагнитное.

Это говорит о том, что механизмы, лежащие в природе температуропроводности и теплопроводности напыленного и литого никеля, отличаются друг от друга. Исходя из структуры напыленного образца (см. рис. 1), можно предположить, что перенос тепла в покрытиях определяется их слоистым строением, наличием пор, трещин и границ раздела между частицами и осуществляется следующими механизмами:

1) электронами по телу самих металлических частиц, составляющих по-

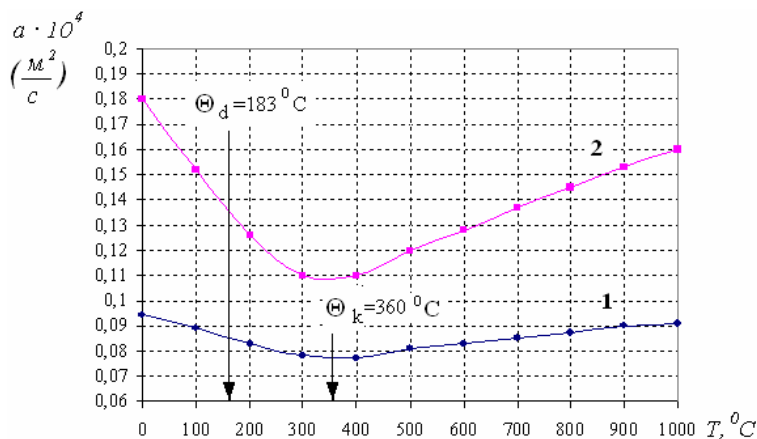


Рис. 3. Температурная зависимость температуропроводности детонационно-газовонапыленного (1) и литого отожженного никеля (2) (Θ_d – температура Дебая, Θ_k – температура Кюри)

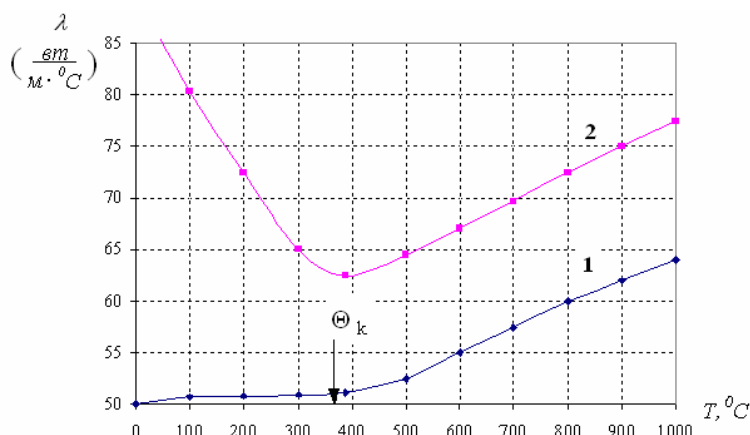


Рис. 4. Температурная зависимость теплопроводности детонационно-газовонапыленного (1) и литого отожженного никеля (2)

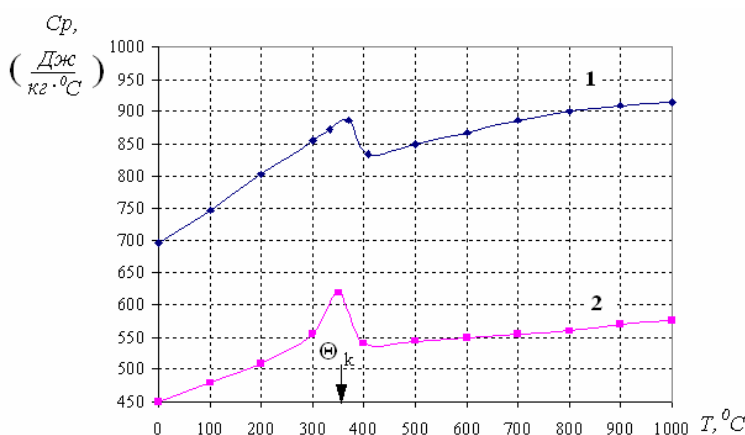


Рис. 5. Температурная зависимость теплоемкости детонационно-газовонапыленного (1) и литого отожженного никеля (2)

крытие, а также на участках приваривания, поскольку здесь образовались прочные металлические связи между частицами (λ_e);

2) за счет решеточной и фононной теплопроводности в частицах и по участкам приваривания между частицами (λ_ϕ) для неметаллических покрытий;

3) теплопроводностью газа, заключенного в порах покрытия (λ_r);

4) лучистым теплообменом в порах в случае нагрева покрытия до высокой температуры (λ_L).

Поскольку границы раздела между частицами не полностью заполнены участками или очагами сваривания, а передача тепла по механизмам 3 и 4 происходит медленно, суммарный коэффициент теплопроводности покрытия можно представить в виде

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_\phi + \lambda_r + \lambda_L.$$

Он намного ниже, чем у компактных материалов. По мере увеличения температуры изменяется вклад от этих механизмов в теплопроводность покрытия и поэтому ее зависимость от температуры имеет сложный характер, отличающийся от аналогичной зависимости для компактного материала (см. **рис. 3, 4**). Из сопоставления видно, что теплопроводность покрытия на много ниже теплопроводности массивного материала при любой температуре. Кроме того, необычна зависимость теплопроводности от температуры: в покрытиях с ростом температуры их теплопроводность несколько возрастает или остается приблизительно постоянной до Θ_k , а у компактных материалов теплопроводность по мере возрастания температуры уменьшается до Θ_k , а выше Θ_k , $\lambda(T)$ – растёт. Такая зависимость показывает, что в покрытиях теплопроводность по механизмам 2, 3 и 4 может вносить существенный вклад в общую теплопроводность при повышенной температуре.

Библиографический список

1. Астахов Е.А., Краснов А.Н. Защитные покрытия на металлах. Вып. 5. Киев: Наук. думка, 1971. С. 57–62.
2. Экспериментальная установка для исследования теплофизических свойств твёрдых тел методом периодических тепловых волн / Дубский Г.А., Вдовин К.Н., Нефедьев А.А., Дубская Т.Я. // Вестн. МГТУ. 2007. Вып. № 4. С. 81–88.