
УДК 532.64:541.1

Д-р техн. наук О. Г. Быковский, канд. техн. наук В. Е. Самойлов,
д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий, А. Н. Лаптева, А. В. Бусов, Д. Я. Воронин
Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СМАЧИВАНИЯ ЕГО РАСПЛАВОМ

На специальной установке по определению поверхностных явлений методом лежащей капли проведены исследования смачивания алюминием А0, бронзой БрКмц3-1, сталями 100Х15М2Г2Р и 07Х20Н9Г7Т стальной Ст3 и титановой ВТ1-0 подложках с гладкой после прокатки и дробеструенной поверхностью. Установлено, что во всех случаях краевой угол смачивания расплавами подложек меньше на шероховатой поверхности по сравнению с гладкой. На титановой подложке в тех же комбинациях он меньше по сравнению со стальной вследствие большей химической активности титана и образования промежуточных соединений с меньшей вязкостью. Это связано со снижением поверхностной энергии контактной зоны из-за дрейфа атомов внедрения (прежде всего) к поверхности раздела.

Ключевые слова: шероховатость, краевой угол смачивания, адгезия, когезия, поверхностное натяжение, лежащая капля.

Введение

Нанесение плазменных покрытий на детали машин сопровождается воздействием высокотемпературной плазменно-металлической струи на твердую подложку, когда за несколько проходов, последовательно слой за слоем, формируется покрытие заданной толщины.

При этом температура струи значительно превышает температуру кипения наносимых материалов, что обуславливает не только высокую степень перегрева ее металлической составляющей, но и частичное превращение ее в парообразное состояние. В результате на подложке образуется псевдосплав, отличающийся

своими физико-механическими свойствами от литого сплава аналогичного состава.

Напыляемая поверхность с целью ее активирования часто подвергается предварительной механической обработке путем создания шероховатости различными способами (рис. 1).

Считается, что таким образом создаются условия для лучшего механического закрепления напыляемых частиц на поверхности, однако роль поверхностных явлений на границе раздела жидкая фаза – твердая подложка при плазменном напылении является более сложной.

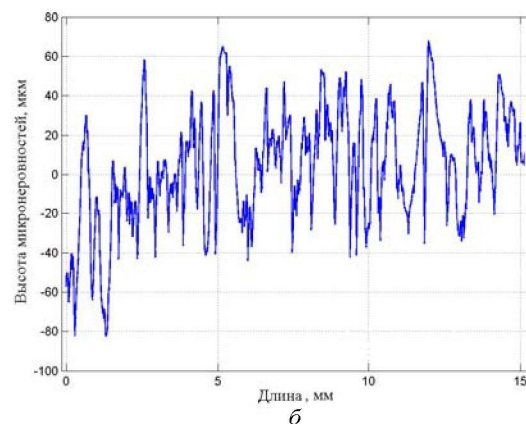
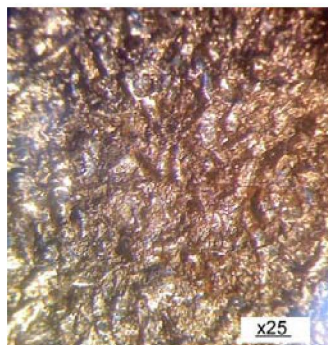


Рис. 1. Вид сверху (а) и профилограмма* (б) дробеструенной поверхности стали Ст 3

* Снята профилографом – профилометром з-да «Калибр» модель 170311 с компьютерной обработкой данных

Немногочисленные исследования по смачиванию твердых тел с различной шероховатостью жидкими сплавами не дают однозначного результата.

Целью работы было исследование характера взаимодействия капель жидкого сплава в зависимости от состояния поверхности твердой подложки различного состава: гладкой после прокатки и подвергнутой дробеструйной обработке с $Rz = 90$ мкм.

Материалы и методика исследования

Исследование поверхностных явлений проводили на специальной установке для определения поверхностного натяжения методом лежащей капли (рис. 2).

Опытный образец из исследуемого материала* (табл. 1) в виде цилиндра диаметром 7 мм и высотой 7 мм, переплавляемый в каплю 8, ставили основанием на подложку 9 из стали Ст 3 или титана ВТ 1-0 размером

20×20×2 мм, находящуюся на подставке 10, и помещали в печь из кварцевого стекла 2. Печь герметично закрывали и пропускали через реакционную камеру 7 из баллона 6 аргон. Водяной затвор 11 обеспечивал герметичность на выходе инертного газа. В целях устранения влияния состава среды на характеристики растекания проводили постоянную очистку аргона от примесей. Нагрев подложки и опытного сплава осуществляли одновременно с помощью индуктора 3 от лампового генератора 4 на режиме: анодный ток = 1,12 А; ток сетки = 0,16 А; частота 440 кГц.

Специальный проектор 1 обеспечивал необходимую подсветку, а сам процесс нагрева, плавления и растекания каждого сплава на подложке фиксировали с помощью видеокамеры «Canon 500d» со скоростью 25 кадров в секунду с последующим анализом результатов на компьютере с помощью мультимедийного плеера и диспетчера рисунков «MicrosoftOffice».

Изучение характера смачивания и растекания проводили на распечатанных снимках размером 25×18 см, где четко фиксировались во времени различные стадии

*Приведенные материалы применяются для плазменного напыления коррозионностойких и износостойких поверхностей в металлургии, энергетике и электротехнике.

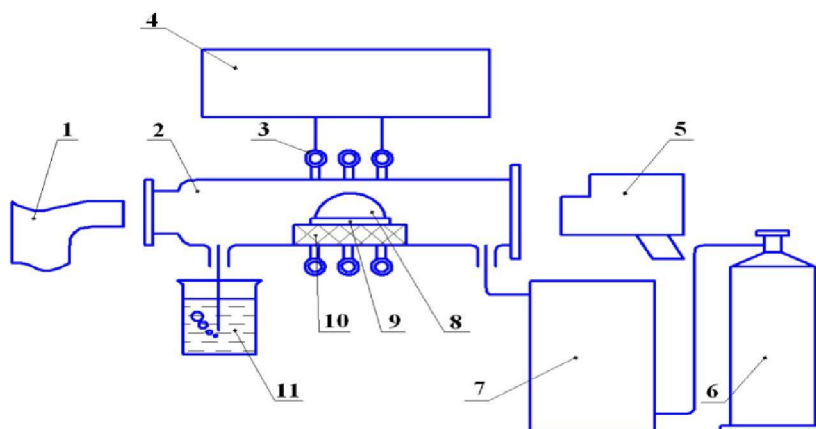


Рис. 2. Схема установки для определения поверхностного натяжения

процесса (начало плавления, растекание жидкой фазы, кинетика растекания и т. п.) (рис. 3). Краевой угол смачивания измеряли с точностью до $0,5^\circ$, а линейные размеры капли с точностью до $0,1$ мм. Во всех случаях длительность опытов на стальной подложке была принята одинаковой для каждого сочетания сплав – необработанная подложка и сплав – дробеструенная подложка и составляла для бронзы Бр КМц 3-1 – 13 с, алюминия А0 – 10 с, сплава 100Х15М2Г2Р – 15 с, сплава 07Х20Н9Г7Т – 20 с, а на титановой подложке для бронзы Бр КМц 3-1 – 17 с, алюминия А0 – 13 с, сплава 100Х15М2Г2Р – 16 с.

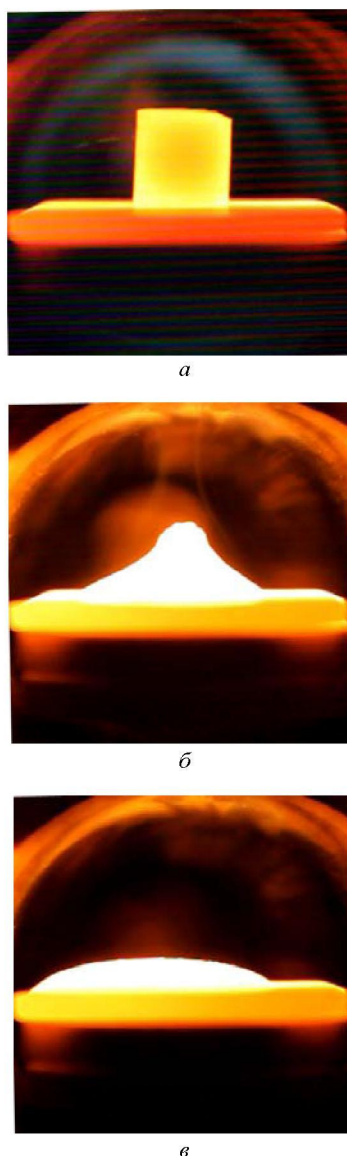


Рис. 3. Последовательность превращения образца в жидкую каплю: *а* – исходное состояние; *б* – растекание жидкой фазы; *в* – образование жидкой капли

Для определения поверхностных характеристик измерялись размеры капли (рис. 4).

Поверхностное натяжение материала образцов на границе жидкость-газ определяли из уравнения:

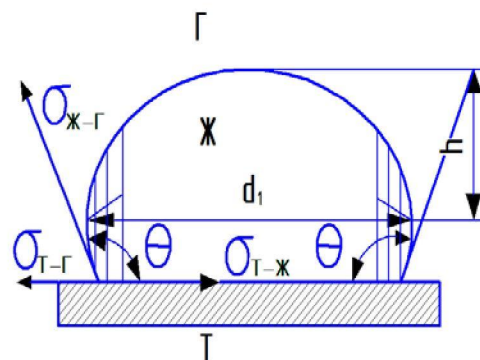


Рис. 4. Схема расположения капли на твердой подложке: d_1 – максимальный диаметр капли; h – расстояние от максимального диаметра до вершины капли; θ – краевой угол смачивания; $\sigma_{ж-г}$ – поверхностное натяжение на границе раздела жидкость-газ; $\sigma_{т-ж}$ – поверхностное натяжение на границе твердое тело-жидкость; $\sigma_{т-г}$ – поверхностное натяжение на границе твердое тело-газ

$$\sigma_{ж-г} = d_1^2 \cdot \frac{1}{H} \cdot \Delta\rho \cdot g [1], \quad (1)$$

где $d_1 = \frac{d_1}{M}$ – экваториальный диаметр капли, см; d_1 – диаметр капли на снимке, см; $M = \frac{D}{d}$ – масштаб эксперимента; D – диаметр образца на снимке, мм; d – диаметр исходного образца, мм; $\frac{1}{H}$ – функция в зависимости от соотношения $\frac{d_1}{2h}$, выбирается в соответствии с [1]; $\Delta\rho = \rho_{образца} - \rho_{Ar}$, где $\rho_{образца}$ – плотность материала образца при температуре плавления, г/см³; ρ_{Ar} – плотность аргона, г/см³; g – ускорение силы тяжести (981 г/см²).

При этом работу адгезии оценивали по формуле:

$$A_{адг} = \gamma_{ж-г} \cdot (1 + \cos \theta), \quad (2)$$

работу когезии по зависимости

$$A_{ког} = 2\gamma_{ж-г}. \quad (3)$$

Здесь γ – величина, эквивалентная поверхностной энергии (при повышенной температуре).

Результаты и их обсуждения

Анализируя данные таблицы, можно сказать, что во всех случаях исследованные сплавы лучше растекаются на шероховатой (развитой) поверхности, чем на гладкой поверхности твердого тела независимо от его состава. Это можно связать с тем, что поверхность, подверженная дробеструйной обработке, активируется в результате процессов экструзии и интрузии металла под действием механической деформации.

Таблиця 1 – Влияние материала образца и подложки на характеристики смачивания

Материал		θ , град	$\gamma_{ж-г}$, МДж/м ²	$A_{адг}$, МДж/м ²	$A_{ког}$, МДж/м ²
Подложка	Образец				
Сталь Ст 3	Бронза	<u>28</u>	<u>501</u>	<u>942</u>	<u>1002</u>
	БрКМц 3-1	<u>46</u>	<u>533</u>	<u>922</u>	<u>1066</u>
	Алюминий А0	<u>96</u>	<u>865</u>	<u>775</u>	<u>1730</u>
		<u>102</u>	<u>821</u>	<u>650</u>	<u>1642</u>
	Сплав 100X15M2Г2Р	<u>29</u>	<u>387</u>	<u>726</u>	<u>774</u>
		<u>32</u>	<u>368</u>	<u>680</u>	<u>736</u>
	Сплав 07X20Н9Г7Т	<u>24</u>	<u>686</u>	<u>1310</u>	<u>1372</u>
		<u>26</u>	<u>615</u>	<u>1169</u>	<u>1230</u>
Титан BT 1-0	Бронза	<u>23</u>	<u>542</u>	<u>1041</u>	<u>1084</u>
	БрКМц 3-1	<u>29</u>	<u>538</u>	<u>1009</u>	<u>1076</u>
	Алюминий А0	<u>93</u>	<u>893</u>	<u>846</u>	<u>1786</u>
		<u>96</u>	<u>856</u>	<u>766</u>	<u>1712</u>
	Сплав 100X15M2Г2Р	<u>24</u>	<u>388</u>	<u>743</u>	<u>776</u>
		<u>31</u>	<u>372</u>	<u>691</u>	<u>744</u>

Примечание. В числителе приведены значения для подложки с дробеструенной поверхностью, в знаменателе – с гладкой поверхностью

Смачивание металлическими расплавами шероховатой поверхности сопровождается увеличением фактической площади контакта жидкой фазы с твердой подложкой, чего нет при контакте жидкой фазы с гладкой поверхностью твердого тела. Это увеличение отражается на возрастании величины межфазной энергии на границе раздела твердое тело с шероховатой (развитой) поверхностью – конденсированная фаза (жидкость) $\sigma_{т-ж}$.

Согласно данным таблицы, краевые углы смачивания каплями горячего расплава всегда меньше в случае обработанных дробью подложек, чем при использовании гладких подложек. Это означает, что работа адгезии для всех вариантов испытаний является большей для шероховатых поверхностей. При такой механической обработке увеличивается средняя поверхностная энергия γ материала подложки и кроме того в поверхностном слое подложек сохраняются напряжения сжатия. Поэтому адгезия нанесенного слоя расплава должна быть меньше, а краевые углы больше, чем для случая использования необработанных поверхностей.

Однако данные таблицы свидетельствуют об обратном. Объяснение такой аномалии необходимо искать с позиций статистической термодинамики и диффузионной теории.

Известно соотношение для поверхностных явлений, описывающее величину адгезии:

$$A_{адг} = \gamma_{подл} + \gamma_{распл} + \gamma_{распл/подл}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что увеличение энергии расплава/подложки снижает величину адгезии. С учетом уравнения Юнга, выражение (4) переходит в уравнение Дюпре, которое в нашем случае можно записать в виде:

$$1 + \cos \theta = 2 \cdot \frac{A_{адг}}{A_{ког}}. \quad (5)$$

Уменьшение $A_{адг}$ при сохранении $A_{ког}$ ведет к увеличению угла θ , так как левая часть уравнения (5) тоже уменьшается ($\cos \theta$ уменьшается до 0 с ростом угла θ до 90°). Угол $\theta = 90^\circ$ является граничным: при его превышении адгезия становится меньше половины когезии, и капля жидкого расплава практически перестает растекаться по подложке.

В случае, когда $\theta < 90^\circ$, ситуация обратная, т. е. имеется определенная склонность к растеканию расплава, и эффект адгезии усиливается. При сравнении выражения (4) и (5) становится очевидным, что управлять фактором адгезии (при относительно слабом изменении другого фактора – когезии) можно за счет энергии $\gamma_{распл/подл}$. Уменьшение этой характеристики (табл. 1) во всех рассмотренных случаях с использованием дробеструенных подложек приводит к увеличению работы адгезии. Объяснением такого поведения комбинированных систем (расплав-подложка) может служить активный «теплый» диффузионный дрейф атомов внедрения (углерода прежде всего) и некоторых атомов замещения в зоны сжатия-расширения поверхности подложки. Такое поведение атомов комбинированных систем отвечает явлению восходящей диффузии в нагретой зоне контакта [2] горячей капли расплава и холодной подложки.

Вывод

Шероховатая поверхность стальной и титановой подложки лучше смачивается приведенными расплавами по сравнению с гладкой вследствие снижения поверхностной энергии контактной зоны из-за дрейфа прежде всего атомов внедрения к поверхности раздела.

Список литературы

1. Кошевник А. Ю. Измерение поверхностного натяжения по размерам лежащей капли / Кошевник А. Ю., Кусанов М. М., Лубман Н. М. // Журнал физической химии. – 1953. – Т. XXVII, вып. 12. – С. 1887–1890.
2. Исследование контактной выносливости сталей различной теплоустойчивости / [Ольшанецкий В. Е., Михайлов Л. А., Вильчек А. И., Банас И. П.] // ФХММ. – 1971. – № 2. – С. 3–8.

Одержано 05.11.2013

Биковський О.Г., Самойлов В.Є., Ольшанецький В.Ю., Лаптева А.Н., Бусов А.В., Воронін Д.Я. Вплив стану поверхні твердого тіла на характеристики змочування його розплавом

На спеціальній установці з визначення поверхневих явищ методом лежачої краплі проведені дослідження змочування алюмінієм А0, бронзою БрКМц3-1, сталями 100Х15М2Г2Р і 07Х20Н9Г7Т сталевोї Ст3 і титанової VT1-0 підкладок з гладкою після прокатки і обробленої дробом поверхнею.

Встановлено, що у всіх випадках крайовий кут змочування розплавами підкладок менший на шорсткій поверхні порівняно з гладкою. На титановій підкладці в тих же комбінаціях він менший порівняно зі сталевом внаслідок більшої хімічної активності титану й утворення проміжних сполук з меншою в'язкістю. Це пов'язано зі зниженням поверхневої енергії контактної зони внаслідок дрейфу атомів (передусім впровадження) до поверхні поділу.

Ключові слова: шорсткість, крайовий кут змочування, адгезія, когезія, поверхневий натяг, лежача крапля.

Bykovskiy O., Samoylov V., Olshanetskiy V., Lapteva A., Busov D., Voronin D. Effect of solid surface on its melt wetting characteristics

A special unit to determine the surface phenomena by sessile drop method was used to study wetting A0 aluminum, bronze BrKmts3-1 steels 100H15M2G2R and 07H20N9G7T of St3 steel and titanium VT1-0 substrates with a smooth-rolled and shot-blast surface.

It was found that in all cases, the contact angle is less than the substrate melts at the rough surface compared with the smooth. At titanium substrate under the same combination it is smaller as compared with the steel due to the greater reactivity of titanium and the formation of intermediates with lower viscosity. This is due to reduction of contact zone energy surface owing to drift interstitial atoms to surface of division.

Key words: roughness, contact angle, adhesion, cohesion, surface tension, sessile drop.
