

УДК 621.793

Эволюция температуры подложки при движении сопла в условиях холодного газодинамического напыления*

С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, В.С. Шикалов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: klyiii@yandex.ru, vkos@itam.nsc.ru

Представлены результаты исследования эволюции температуры подложки при перемещении сопла в условиях холодного газодинамического напыления. Предложена модель для расчета температуры подложки и проведена ее верификация. Получены расчетные данные в типичном диапазоне изменения скорости перемещения сопла, толщины подложки и ее начальной температуры, которые встречаются на практике напыления. Показано, что имеется оптимальная начальная температура подложки, при которой изменение температуры в пятне напыления минимально.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, теплообмен, температура поверхности, скорость перемещения сопла.

Введение

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) — это быстроразвивающийся метод, который берет свое начало от открытия явления образования покрытий при ударе расплавленных металлических частиц в ИТПМ СО РАН в начале 1980-х годов [1]. ХГН позволяет получать покрытия из металлов, сплавов, композитных порошков, смесей порошков, в том числе с неметаллами, полимерами и т.д. на изделия из металлов и диэлектриков, включая керамику и стекло [2–13].

Наличие критической (минимальной) скорости удара частиц [14] и стадии активации напыляемой поверхности (задержки напыления) [15, 16], возможность пластической деформации частиц при ударе и т.д. являются основными закономерностями образования покрытий. На эрозионно-адгезионный переход (переход от эрозии подложки к образованию на ней покрытия) в первую очередь влияет скорость удара частиц о поверхность. Также заметное влияние оказывает температура поверхности в пятне напыления, температура частиц и их размер.

Газодинамика процесса напыления (зависимости скорости и температуры частиц от параметров напыления) изучена достаточно подробно [17–24]. Однако теплообмен струи с подложкой и зависимость температуры подложки в пятне напыления от параметров

* Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-08-00538 с использованием ЦКМ «Механика» (ИТПМ СО РАН).

напыления, скорости перемещения сопла, размеров и материала подложки требует дальнейших исследований. Поскольку температура поверхности подложки влияет на процесс напыления, исследование ее зависимости от основных параметров (таких как скорость перемещения сопла, температура торможения газа, геометрические размеры, начальная температура и материал подложки) является актуальной задачей.

Первые исследования по изучению влияния температуры подложки были проведены в ИТПМ СО РАН [25]. Был получен принципиально важный результат: в условиях, когда ускоряющий частицы алюминия газ (воздух) не подогревался, а подогревалась стальная подложка, при некоторой температуре подложки (около 700 К или 427 °С) наблюдалось образование покрытия. Это подтверждает, что подогрев подложки снижает критическую скорость эрозионно-адгезионного перехода. Другими словами, частицы могут формировать покрытие при более низкой скорости удара и при более низкой своей температуре (по оценкам около 260 К). В следующих работах также отмечалось влияние температуры подложки на процесс ХГН. В работе [26] было показано, что начальный подогрев подложки из нержавеющей стали в диапазоне 300 – 673 К (27 – 400 °С) при ускорении медных частиц неподогретым гелием приводит к росту коэффициента напыления одиночных частиц меди. Однако мониторинга температуры поверхности не проводилось, что не позволяет оценить фактическую температуру поверхности подложки в процессе напыления частиц. В работе [27] изучалось влияние предварительного подогрева подложек (до 548 К или 375 °С в максимуме) из алюминиевого сплава на остаточные напряжения в алюминиевом покрытии. Напыление проводилось с помощью азота (2,5 МПа, 623 К или 350 °С) при скорости перемещения сопла 100 мм/с и дистанции 20 мм. Измерений температуры при движении струи не проводилось. Два метода не показали заметного изменения напряжений с ростом начальной температуры подложки, третий показал их уменьшение. Авторы предположили, что наиболее вероятно это произошло из-за того, что использовались образцы подложек разного размера: для первых двух методов размер составлял 2 × 19 × 76 мм, для третьего — 5,95 × 25 × 25 мм. В работе [28] авторы показали, что предварительный подогрев подложки приводит к увеличению адгезии покрытий из магния. Подложки из алюминия размером 2 × 20 × 60 мм нагревались предварительно до температур 373, 473 и 573 К (100, 200 и 300 °С). Затем проводилось напыление струей воздуха (2,5 МПа, 773 К или 500 °С) с дистанции 30 мм со скоростью перемещения сопла 100 мм/с. Авторы полагали, что такая высокая скорость перемещения не меняет существенно температуру подложки в пятне напыления. Измерения температуры в процессе напыления не проводилось. С ростом температуры подложки адгезия постепенно увеличивалась от 3,3 МПа до 11,6 МПа при 473 К (200 °С), а при 573 К (300 °С) она оказалась примерно на 10 % меньше максимальной. В работе [29] авторы показали, что при предварительном нагреве медной подложки до 573 К или 300 °С все больше медных частиц закреплялось на ней (в режиме напыления одиночных частиц при скорости перемещения сопла 500 мм/с), частицы ускорялись воздухом (2,5 МПа, 773 К или 500 °С). Здесь также было выполнено моделирование удара одиночных частиц и показано, что глубина проникания их в подложку увеличивается. В работе [30] авторы заключили, что предварительный подогрев подложек увеличивает адгезию медных покрытий на керамическом покрытии (корунд), полученном плазмой на металлах. Мониторинг температуры подложки в пятне напыления не проводился. В работе [31] авторы изучали влияние предварительного подогрева подложек до 473 К или 200 °С из разных материалов на адгезию покрытий из разных порошков. Напыление проводилось азотом (2 МПа, 673 К или 400 °С) с дистанции 40 мм при скорости перемещения сопла 80 мм/с. Было установлено, что подогрев подложек улучшил адгезию в случаях медного покрытия на алюминиевой и железной подложках, а также железного покрытия на медной подложке. Улучшение адгезии авторы связывают с термическими напряжениями, которые уменьшаются при нагреве подложки. Также здесь приводятся данные измерения температуры алюминиевой подложки (хотя

размеры подложки не указаны) в процессе напыления медного покрытия. Максимальные показания термомпары на неподогретой подложке составили ≈ 373 К (100 °С), а на подогретой подложке до 373 К (100 °С) $\div \approx 413$ К (140 °С). Было отмечено, что подложка, предварительно нагретая до 474 К (200 °С), слегка охлаждается — до ≈ 443 К (170 °С). Последнее авторы связывают с оттоком тепла в частицы, буквально: «... подложка охлаждалась ударами частиц». В заключение они предположили, что для выравнивания температур подложки и образующегося покрытия следует выбрать температуру подогрева подложки между 373 и 474 К (100 и 200 °С).

В работе [32] инфракрасной камерой измерялась температура поверхности стальной подложки размером $3 \times 100 \times 100$ мм при фиксированной скорости перемещения сопла 2 мм/с, дистанции напыления 10 мм и давлении торможения $0,62$ МПа, но при разных температурах торможения азота. С ростом температуры торможения был обнаружен линейный рост температуры поверхности от комнатной до 453 К (180 °С), последняя была получена при температуре торможения 673 К (400 °С). Изучалось также влияние на температуру поверхности предварительного подогрева подложки при фиксированной температуре торможения (773 К или 500 °С). Было обнаружено нелинейное увеличение от 493 К (220 °С) до 573 К (300 °С) при изначально комнатной температуре поверхности подложки и до 603 К (330 °С) при изначально подогретой. Следует отметить, что авторы обнаружили незначительное уменьшение температуры поверхности до 575 К (300 °С) под струей по сравнению с начальной 603 К (330 °С) несмотря на то, что температура торможения была 773 К (500 °С), т.е. заметно выше. Однако объяснений этому факту они не дали. Дополнительно авторы обнаружили, что для порошка алюминия коэффициент напыления увеличивается с ростом температуры стальной подложки, для порошка цинка — наоборот, а для порошка олова никакого существенного изменения не наблюдалось.

В работе [33] инфракрасной камерой измерялась температура поверхности подложки (без частиц) при движении азотной струи ($2,5$ МПа, 873 К или 600 °С) по алюминиевой подложке (размеры не приведены) со скоростью 50 мм/с. Она оказалась равной 413 К (140 °С). Авторы упоминают, что при длительном удержании струи без движения (1 мин) температура подложки достигает максимума, равного 653 К (380 °С).

В работе [34] измерялась температура алюминиевой подложки ($5 \times 119 \times 115$ мм) в стационарном случае при натекании воздушной струи ($2,7$ МПа, 673 К или 400 °С) с помощью двух термопар (одна располагалась по центру, вторая — в 50 мм от центра) при разных дистанциях от среза сопла (от 10 до 50 мм). Авторы зафиксировали уменьшение максимальных температур в центре от 500 К (227 °С) до 470 К (197 °С) и на краю (в 50 мм от центра) от 400 К (127 °С) до 380 К (107 °С) соответственно при увеличении дистанции от 10 до 50 мм. Также были проведены расчеты с помощью пакета Ansys Fluent (с учетом теплообмена и теплопроводности подложки), которые совпали с результатами измерений. Расчеты для медных, стальных и титановых подложек одинаковых размеров (толщиной 5 мм и диаметром 110 мм) показали, что распределение температуры по радиусу оказалось близким для титана и стали с максимальным значением 600 – 630 К (327 – 357 °С) в центре. Для медной подложки была получена величина температуры в центре 470 К (197 °С), т.е. близкая к температуре алюминиевой подложки. Разность температур на фронтальной и тыльной сторонах подложки в центре составила ≈ 30 К для алюминия, 130 К для стали и 200 К для титана при дистанции 30 мм. Таким образом, даже для сравнительно толстых подложек (5 мм) из алюминия и меди неравномерность распределения температуры по толщине оказывается менее 30 К. В работе [35] измерялась температура подложки в стационарном случае при натекании воздушной струи ($2,7$ МПа, 473 , 673 и 873 К или соответственно 200 , 400 и 600 °С) на подложку из нержавеющей стали ($8 \times 119 \times 115$ мм) с помощью двух термопар (одна располагалась по центру, вторая —

в 50 мм от центра) при разных дистанциях от среза сопла (от 10 до 50 мм). При температуре торможения 673 К (400 °С) авторы получили уменьшение температур в центре от 560 К (287 °С) до 530 К (257 °С) при увеличении дистанции от 10 до 50 мм, и от 390 К (117 °С) до 350 К (77 °С) на краю подложки (в 50 мм от центра). Аналогично при температуре торможения 873 К (600 °С) уменьшение температуры составляло в центре от 720 К (457 °С) до 650 К (377 °С), на краю — от 420 К (147 °С) до 390 К (117 °С). При температуре торможения 473 К (200 °С) в исследованном диапазоне дистанций заметного уменьшения температуры подложки не наблюдалось, в центре она составила ≈ 400 К (127 °С), на краю — ≈ 325 К (52 °С). Авторы также проводили моделирование, где в качестве подложки рассматривались шайбы толщиной также 8 мм, но диаметром 110 мм. Рассчитанные температуры подложки оказались на 50 – 100 К выше по сравнению с измеренными. В работе [36] авторы выполнили моделирование стационарного натекания струи воздуха (2,7 МПа, 773 К или 500 °С) на подложки из нержавеющей стали диаметром 20 мм разной толщины — от 3 до 12 мм. Было обнаружено, что с увеличением толщины подложки от 3 до 12 мм температура в центре несколько падает — от 710 К (437 °С) до 680 К (407 °С). При этом градиент температуры в центре вглубь подложки заметно увеличивается с ростом толщины подложки: от 25 К до 110 К. В работе [37] при тех же параметрах воздушной струи (2,7 МПа, 773 К или 500 °С) численно было изучено для стационарного случая распределение температуры в стальной подложке, выполненной в виде шайбы толщиной 3 мм и диаметром 20 мм и расположенной в 16 мм от среза сопла, при трех разных углах к оси струи — 90°, 75° и 60°. Нужно отметить, что влияние угла оказалось слабым — температуры в центре практически не отличаются (отличие менее 10 К) и равны приблизительно 600 К (327 °С). Максимальное отличие не превосходит 40 К и реализуется на том крае подложки, куда течет меньше всего газа. При нормальном натекании температура на крае подложки составляет около 560 К (287 °С), а при натекании под углом 60° — ≈ 520 К (247 °С).

В работе [38] в стационарных условиях (т.е. без движения сопла) было получено распределение температуры поверхности подложки размером $3,1 \times 76,2 \times 76,2$ мм из особого материала Lexan (polycarbonate resin thermoplastic), обладающего низкой теплопроводностью (0,2 Вт/м К), с помощью инфракрасной камеры. В исследованиях использовалась установка ХГН низкого давления (азот, 0,69 МПа, 373 – 473 К или 100 – 200 °С). Затем, решая обратную задачу, авторы получили распределение коэффициента теплообмена струи с преградой и далее использовали его для моделирования распределения температуры на подложках из других материалов. Эти расчетные распределения сравнивались с измеренными. Так, для стальной подложки (тех же размеров) прирост температуры в центре составил 0,5 от разности между температурой торможения и начальной (комнатной) температурой подложки, для медной подложки (тех же размеров) он составил 0,35. Можно также отметить, что прирост не зависит от размера подложки в плане (по крайней мере, авторы провели расчеты и эксперименты для стальной подложки размером $177,8 \times 177,8$ мм в плане при той же толщине и получили идентичный результат — 0,5). В работе [39] прежде всего было отмечено, что подогрев подложки для улучшения качества покрытий при ХГН привел к созданию гибридной технологии под названием Laser Assisted Cold Spray, представленной на тот момент (т.е. в 2013 году) в работах [40–42]. Далее, используя распределение температуры торможения и коэффициента теплообмена (см. [38]), авторы проводят моделирование и сравнение с результатами экспериментов, полученными с помощью инфракрасной камеры, и демонстрируют следующие выводы.

1. Максимальная температура в пятне при стационарном обтекании стальной пластины ($3 \times 76,2 \times 76,2$ мм) пропорциональна температуре торможения струи (воздух, 0,62 МПа, температура торможения в диапазоне 373 – 673 К или 100 – 400 °С), т.е. прирост температуры подложки, отнесенный к приросту температуры торможения, остается постоянной величиной.

2. Приводятся распределения температур по поверхности стальной подложки при разной ее толщине (от 0,5 до 6,2 мм). Относительный прирост максимальной температуры поверхности падает с увеличением толщины подложки с 0,67 до 0,4.

3. Приводится распределение температуры поверхности для разных материалов подложек при одинаковой их толщине, равной 1,6 мм. Авторам удается найти обобщение в виде произведения коэффициента теплопроводности на толщину подложки. Если это произведение остается константой, то и относительный прирост максимальной температуры поверхности тоже будет константой.

В итоге, согласно их исследованию, можно записать

$$\frac{T_{sm} - T_R}{T_{00} - T_R} = \Phi(\lambda \cdot \delta),$$

где T_{sm} — максимальная температура поверхности подложки, T_R — комнатная температура, T_{00} — температура торможения на оси струи, $\Phi(\lambda \cdot \delta)$ — монотонная убывающая функция (типа $1/x$).

Для разных материалов авторы приняли следующие величины коэффициента теплопроводности: Lexan — 0,2, нержавеющая сталь 304 — 25, сталь 1020 — 52, алюминий — 210, медь — 385 ед. СИ.

4. Авторы приводят данные для разных скоростей перемещения сопла (от 2 до 150 мм/с) при температуре торможения 673 К (400 °С) по стальной подложке (ее толщина не приведена). Показано, что относительный прирост максимальной температуры монотонно уменьшается с ростом скорости перемещения сопла. В логарифмических координатах по скорости перемещения сопла зависимость является не вполне нелинейной.

5. Представлено также распределение температуры по поверхности лексана при двух разных давлениях в форкамере (0,69 и 0,28 МПа). При меньшем давлении распределение оказалось несколько шире ($r_{0,5} = 16$ мм и 12,5 мм).

6. Также авторы приводят профиль температуры при большей дистанции (40 мм против 10 мм). Максимальный прирост температуры подложки оказывается на большей дистанции меньше (примерно на 10 %).

В работе [43] измерялась температура титановой подложки (5 × 70 × 70 мм) с помощью пяти термопар при стационарном натекании струи азота (1,4 МПа, 823 К или 550 °С). Максимальное показание достигало 478 К (205 °С). Авторы использовали этот эксперимент для подстройки модели. Еще один эксперимент был проведен с параметрами струи 3 МПа 1073 К (800 °С), в котором максимальное показание равнялось 653 К (380 °С).

В работе [44] инфракрасной камерой проводилось измерение температуры поверхности никелевого покрытия в центре алюминиевой подложки (5 × 50 × 100 мм) при напылении воздухом (2,4 МПа, 633 К или 360 °С). Напыление выполнялось с дистанции 30 мм сканированием с разной скоростью перемещения сопла (от 50 до 200 мм/с) с наложением 5 слоев. В большинстве случаев после наложения первого слоя при наложении последующих слоев максимальная температура в пятне не менялась (даже при скорости 200 мм/с разница между первым пиком (493 К или 220 °С) и последним (523 К или 250 °С) была невелика, около 30 К. При изменении скорости перемещения сопла от 50 до 200 мм/с температура в пиках в среднем менялась от 553 К (280 °С) до 513 К (240 °С). Кроме того, авторы обнаружили уменьшение относительного коэффициента напыления от 1 до 0,2 (величина коэффициента напыления при скорости 50 мм/с была принята авторами за 1) с ростом скорости перемещения сопла от 50 до 200 мм/с, которое они связывают с уменьшением температуры поверхности подложки. В этой работе, возможно впервые была построена модель образования покрытия с учетом теплообмена с газом и теплопроводности подложки и покрытия. Однако описание ее нельзя признать удовлетворительным. Напротив, непонятно, как закреплялась подложка и за счет чего происходило ее охлаждение.

Из представленного выше обзора можно сделать следующие выводы. Сначала рассмотрим ситуацию, когда подложка изначально находится при комнатной температуре.

1. При стационарном натекании струи температура подложки в месте натекания струи достигает некоторого максимального значения, которое всегда ниже температуры торможения. При увеличении толщины и/или теплопроводности подложки эта максимальная температура уменьшается.

2. При нестационарном натекании температура подложки под струей заметно уменьшается с ростом скорости перемещения сопла (2 – 200 мм/с).

3. Подогрев подложки влияет на процесс напыления и свойства получаемых покрытий (например, может приводить к увеличению доли закрепившихся частиц, адгезии, плотности и электропроводности покрытий, уменьшению остаточных напряжений и микротвердости). При подогреве в некоторых случаях наблюдалось уменьшение температуры подложки в пятне напыления от первоначального её значения несмотря на то, что температура торможения была выше.

В работе [45] было показано, что при ХГН с увеличением температуры торможения ускоряющего частицы воздуха уменьшается задержка напыления (т.е. уменьшается масса частиц, расходуемая на активацию единицы поверхности подложки, прежде чем начинается рост покрытия). Эксперименты проводились с использованием сравнительно тонких подложек (1 мм) из алюминия. Очевидно, что температура торможения влечет за собой увеличение не только скорости и температуры частиц, но и температуры подложки. Увеличение скорости перемещения сопла, наоборот, приводит к уменьшению температуры подложки. Для того, чтобы попытаться разделить эффекты, связанные с температурой подложки, понадобилось создание модели для оценки температуры в пятне напыления. Такая модель была создана в приближении тонких подложек, т.е. когда можно не учитывать изменение температуры по толщине подложки в силу его малости. Это приближение позволяет экономить расчетное время и дает возможность решать более сложные задачи (например, рассмотреть более сложные траектории движения сопла, чем в указанной работе).

Настоящая работа представляет предварительные (без учета вклада частиц) экспериментальные и расчетные данные в типичных диапазонах изменения скорости перемещения сопла (1 – 400 мм/с) и температуры торможения (200 – 600 °С), встречающихся в практике напыления. Экспериментальные данные используются для верификации расчетной модели. Также приводятся результаты расчетов, полученные для разных начальных температур и толщин подложек.

Экспериментальная установка и методы

Измерения проводились с помощью сборки (рис. 1), включающей основу со слоем керамического теплоизолятора, на который устанавливалась подложка из алюминия $50 \times 50 \times 1$ мм. Подложка прижималась через керамический изолятор стальной рамкой толщиной 1 мм. Рамка имела прямоугольный вырез размером 40×20 мм. Перед подложкой и рамкой устанавливалась термопара 1 (для измерения температуры струи). Термопары 2 и 3 монтировались заподлицо с поверхностью подложки симметрично относительно ее середины. Расстояние между термопарами 2 и 3 составляло 20 мм. Первый край подложки располагается на расстоянии 18 мм от первой термопары. Параметры газовой струи были следующие: воздух, давление торможения 3 МПа, температура 200, 400 и 600 °С; сопло осесимметричное, профилированное; расчетное число Маха равно 3 (критический диаметр сопла 2,8, выходной — 6,5 мм).

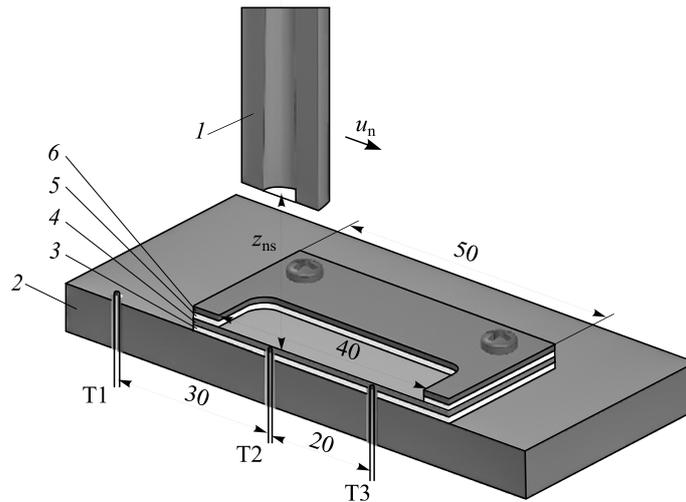


Рис. 1. Схема измерения температуры поверхности подложки при разной скорости перемещения сопла.

1 — сверхзвуковое сопло, 2 — основание, 3 — нижний керамический теплоизолятор, 4 — алюминиевая подложка, 5 — верхний керамический теплоизолятор, 6 — прижимная рамка.

Описание расчетной модели

Как было указано ранее, рассматриваются относительно тонкие подложки, настолько, что перепадом температуры по толщине подложки можно было бы пренебречь (ниже будет приведена оценка толщины подложки, при которой это предположение выполняется). Поверхность подложки разбивается на квадраты со стороной, равной 1 мм, и таким образом вычисляется средняя температура в параллелепипеде с высотой равной толщине подложки. В каждом параллелепипеде на первом шаге вычисляются потоки тепла через его стенки:

$$qx_{i,j} = -\lambda_s h_s dy \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{dx}, \quad qy_{i,j} = -\lambda_s h_s dx \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{dy}, \quad qw_{i,j} = -\alpha dx dy (T_0 - T_{i,j}),$$

где $T_{i,j}$ — температура подложки, λ_s — теплопроводность подложки, h_s — толщина подложки, α — коэффициент теплообмена между струей и подложкой, T_0 — температура торможения струи. Ось x направлена вдоль движения сопла, ось y — поперек; индексу i соответствует ось x , а j — ось y ; qx — поток тепла, направленный вдоль оси x , qy — поток тепла вдоль оси y , qw — поток тепла через верхнюю поверхность. На боковых сторонах, на нижней (тыльной) стороне подложки, а также на верхней (фронтальной) ее стороне, которая закрыта маской, потоки тепла равны нулю.

Рассматривается осесимметричная струя. Распределения коэффициента теплообмена и температуры торможения вдоль верхней поверхности подложки имеют вид

$$T_0(r) = \frac{T_{00}}{(1+15(r/r_T)^2)^{0,25}}, \quad \alpha(r) = \frac{\alpha_0}{(1+15(r/r_\alpha)^2)^{0,25}},$$

где T_{00} — температура торможения в форкамере, α_0 — коэффициент теплообмена на оси струи, r_T и r_α — соответственно характерная координата уменьшения температуры торможения в два раза по сравнению с температурой на оси и аналогичная величина для коэффициента теплообмена. В расчете приняты $\alpha_0 = 7 \cdot 10^3$ Вт/К м², $r_T = 25$ мм, $r_\alpha = 4$ мм.

На втором шаге расчета в каждом параллелепипеде вычисляются средние температуры:

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \left(qx_{i,j} - qx_{i+1,j} + qy_{i,j} - qy_{i,j+1} + qw_{i,j} \right) \frac{dt}{c_s \rho_s h_s dx dy},$$

где c_s — теплоемкость подложки, ρ_s — плотность подложки, k — число шагов по времени. В начальный (нулевой) момент времени подложка считается равномерно нагретой до заданной температуры.

Отметим, что описанная процедура аппроксимирует дифференциальное уравнение вида

$$\rho_s c_s h_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s h_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \alpha (T_0 - T),$$

что, по сути, представляет собой уравнение теплопроводности с источником тепла. В частности из этого уравнения видно, что на стационарной стадии нагрева (когда $\partial T / \partial t = 0$) при малых величинах произведения $\lambda_s h_s$ (когда $\lambda_s h_s \rightarrow 0$) температура поверхности подложки стремится к температуре торможения (точнее восстановления) обтекающего газа: $(T_0 - T) \rightarrow 0$. Это объясняет некоторые результаты указанных во введении работ [38, 39].

В случае движения сопла с постоянной скоростью u_n радиус r в распределениях температуры торможения и коэффициента теплообмена рассчитывается по формуле

$$r_{i,j} = \sqrt{(x_i - s)^2 + (y_j - L_y / 2)^2}, \quad s = u_n \cdot k \cdot dt,$$

здесь L_y — ширина подложки (максимальный размер вдоль оси y), k — число шагов по времени.

В начальный (нулевой) момент времени ось сопла находится на границе подложки (соответствующей значению $x = 0$). Характеристики материалов, принятые в расчетах, приведены в таблице. Числа Био Bi и Фурье Fo посчитаны для толщины 1 мм и времени 1 с.

Таблица

Характеристики материалов, принятые в расчетах

Материалы	c_s , Дж/(кг·град)	λ_s , Вт/(м·град)	ρ_s , кг/м ³	$\chi_s = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_s}$, м ² /с	$Bi = \frac{\alpha h_s}{\lambda_s}$	$Fo = \frac{\chi_s t}{h_s^2}$
Алюминий	800	250	2700	10^{-4}	0,03	120
Нержавеющая сталь 12X18H10T	500	20	7900	$5 \cdot 10^{-6}$	0,35	5

Оценка перепада температур по толщине подложки

Для оценки перепада температуры по толщине подложки возьмем решение задачи нагрева пластины заданной толщины h_s при ее обтекании потоком жидкости с постоянными параметрами с верхней стороны ($z = h_s$) и в условиях теплоизоляции на противоположной стороне ($z = 0$), т.е. в условиях, когда решение не зависит от двух других координат (см., например, [46]):

$$T(z) - T_g \sim \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos\left(\mu_i \frac{z}{h_s}\right) \exp\left(-\mu_i^2 \frac{\chi_s t}{h_s^2}\right), \quad (1)$$

где $\mu_i \operatorname{tg} \mu_i = \operatorname{Bi} = \alpha h_s / \lambda_s$.

На теплоизолированной стороне пластины имеем

$$T(0) - T_g \sim \sum_{i=1}^{\infty} A_i \exp\left(-\mu_i^2 \frac{\chi_s t}{h_s^2}\right),$$

на обтекаемой поверхности пластины —

$$T(h_s) - T_g \sim \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos(\mu_i) \exp\left(-\mu_i^2 \frac{\chi_s t}{h_s^2}\right).$$

Ограничиваясь только первым членом ряда (верно при $\chi_s t / h_s^2 > 0,3$) и взяв отношение этих величин, получим точное равенство

$$\frac{T(0) - T_g}{T(h_s) - T_g} = \frac{1}{\cos(\mu_1)} \quad \text{или} \quad T(0) - T(h_s) = \left(\frac{1}{\cos \mu_1} - 1\right) (T(h_s) - T_g).$$

Зависимость коэффициента $1/\cos \mu_1 - 1$ от числа Био $\operatorname{Bi} = \alpha h_s / \lambda_s$ в интересующем диапазоне его изменения представлена на рис. 2. Там же приведена линейная аппроксимация $1/\cos \mu_1 - 1 = 0,545 \operatorname{Bi}$.

Таким образом, имеем

$$T(h_s) - T(0) = 0,545 \frac{\alpha h_s}{\lambda_s} (T_0 - T(h_s)), \quad (2)$$

$$T(h_s) - T(0) = \xi (T_0 - T(0)), \quad \xi = 1 - \cos \mu_1 \approx \frac{0,545 \operatorname{Bi}}{1 + 0,545 \operatorname{Bi}}. \quad (3)$$

В формуле (2) в правой части присутствует разность температуры струи и температуры поверхности подложки, которая максимальна в момент, когда струя только начинает натекасть. В формуле (3) в правой части присутствует разность температуры струи и температуры тыльной (теплоизолированной) поверхности подложки. Тыльная сторона подложки (в отличие от фронтальной) начинает нагреваться не сразу, изменение ее температуры заметно через некоторое время, которое необходимо для прогрева (чтобы фронт температуры достиг тыльной стороны подложки). До этих пор она равна начальной температуре подложки. Поэтому формула (3) более удобна для оценок. Она позволяет оценить температуру фронтальной поверхности в момент, когда фронт достиг тыльной стороны подложки. На рис. 3 приведены для сравнения результаты расчета зависимости перепада температуры (при начальной

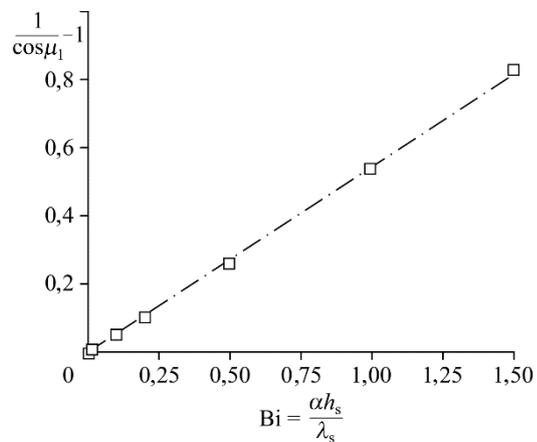


Рис. 2. Зависимость коэффициента $1/\cos \mu_1 - 1$, от числа Био $\operatorname{Bi} = \alpha h_s / \lambda_s$.

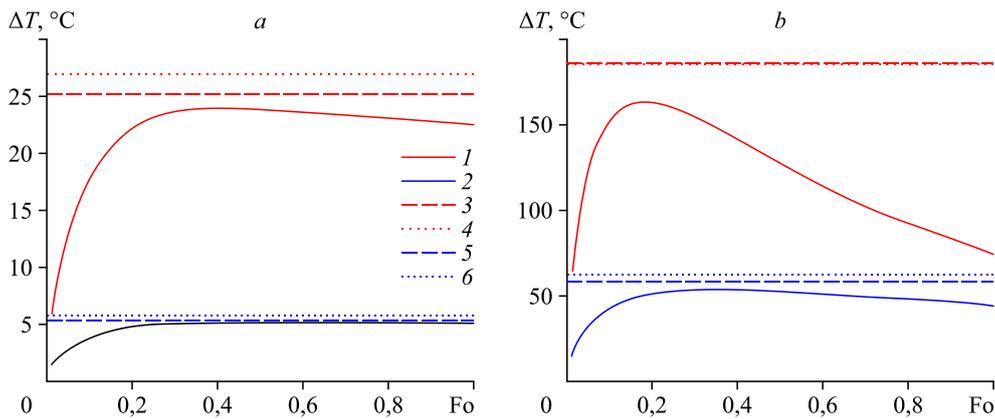


Рис. 3. Зависимость перепада температуры от числа Фурье для подложки из алюминия (а) и нержавеющей стали (б).

1, 2 — перепад температуры, рассчитанный с учетом шести членов ряда точного решения (1);

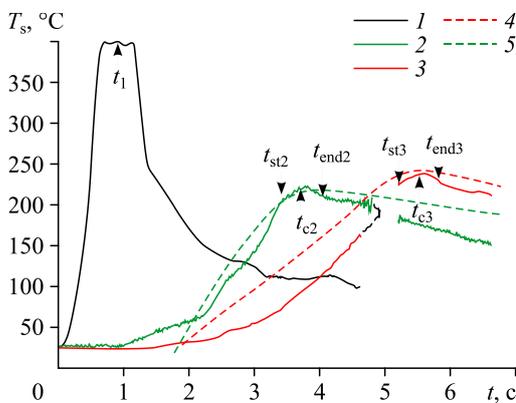
3, 5 — оценка (3) при $\xi = 1 - \cos \mu_1$, 4, 6 — оценка (3) при $\xi = \frac{0,545Bi}{1 + 0,545Bi}$,

1, 3, 4 — подложка толщиной 5 мм; 2, 5, 6 — подложка толщиной 1 мм.

температуре подложки $20 ^\circ\text{C}$ и температуре торможения газа $400 ^\circ\text{C}$) по точному решению (1) с учетом первых шести членов ряда, а также оценки, сделанные по формуле (3), когда коэффициент $\xi = 1 - \cos \mu_1$ (полученный при учете только первого члена ряда) и когда $\xi = \frac{0,545Bi}{1 + 0,545Bi}$ (полученный при аппроксимации). Здесь результаты получены для под-

ложки из алюминия и нержавеющей стали толщиной 1 и 5 мм. Предполагается, что подложки из других материалов будут находиться где-то между этими крайними случаями. Видно, что в представленных случаях оценки (3) дают немного завышенное значение по сравнению с точным решением (1). Другими словами, если оценка (3) показывает незначительное изменение температуры по толщине подложки (как, например, в случае алюминиевой подложки на рис. 3а), то на самом деле разность будет еще меньше, и в этом случае примененное упрощение оправдано. Сделанные оценки оправдывают предположение, что можно принять температуру подложки неизменной по толщине, по крайней мере, для алюминия при толщинах порядка 4 – 5 мм и менее.

Верификация модели



На рис. 4 в качестве примера показаны записанные во времени показания трех термопар для случая нагрева воздуха до $400 ^\circ\text{C}$ и скорости перемещения сопла 10 мм/с . Видно, что температура подложки заметно ниже температуры

Рис. 4. Записанные во времени показания трех термопар для случая нагрева воздуха до $400 ^\circ\text{C}$ при скорости перемещения сопла 10 мм/с . 1, 2 и 3 — показания первой, второй и третьей термопар, 4 и 5 — результаты расчета для третьей и второй термопар соответственно.

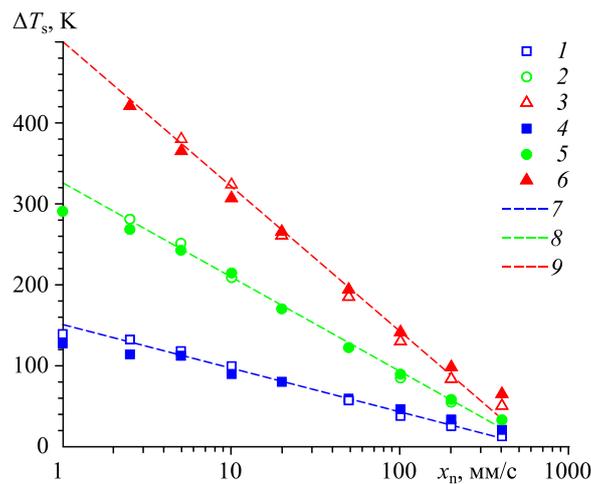


Рис. 5. Зависимость средней температуры, вычисленной по показаниям двух термопар, от скорости перемещения сопла.

1–3 — результаты численных расчетов, 4–6 — результаты экспериментов, 7–9 — аппроксимация; температура торможения 200 °C (1, 4, 7), 400 °C (2, 5, 8) и 600 °C (3, 6, 9).

торможения воздуха. При этом показание третьей термопары несколько больше, чем второй, что указывает на изменение (а именно рост) температуры в пятне напыления по мере движения сопла. На рисунке отмечены также времена, когда передний край струи натекает на место установки термопары (t_{st}) и когда сходит задний край (t_{end}). На этом же рисунке приведены рассчитанные температурные профили. Видно, что положение максимумов t_{c2} , t_{c3} для двух термопар достаточно хорошо предсказывается моделью.

На рис. 5 представлены данные экспериментов и расчетов, выполненные для трех разных температур торможения воздуха. Эти температуры выбирались в качестве средних между максимальными показаниями двух термопар. Следует отметить, что в расчете величина максимального значения коэффициента теплообмена $\alpha_0 = 7 \cdot 10^3$ Вт/(К·м²) подбиралась для наилучшего совпадения результатов измерений при температуре струи 400 °C. Графики показывают, что подобранная величина позволяет достаточно корректно моделировать результаты экспериментов во всех остальных случаях. Далее проводилась аппроксимация расчетных и экспериментальных данных, также приведенная на рис. 5. Видно, что в логарифмических координатах по скорости перемещения сопла наблюдается почти линейная зависимость. Отклонение от этой зависимости имеет место в самых крайних точках.

Результаты расчетов

С использованием верифицированной модели проведены расчеты для оценки влияния на температуру в пятне напыления таких параметров, как размер подложки в плане, толщина подложки и начальная температура подложки.

На рис. 6 показано влияние одного из размеров подложки в плане, а именно длины. Прежде всего отметим, что на этом рисунке изображены три разные температуры. Цифрами 1 и 4 обозначена температура подложки в точке, соответствующей положению оси сопла.

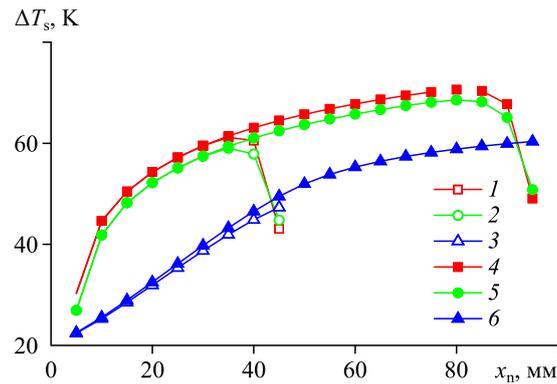


Рис. 6. Зависимость температуры поверхности подложки в пятне напыления от положения оси сопла.

Алюминиевая подложка толщиной 1 мм, температура торможения струи 400 °С, скорость перемещения сопла 200 мм/с, начальная температура подложки 20 °С;
 1, 4 — температура на оси струи, 2, 5 — температура, усредненная по квадрату 7 × 7 мм около оси,
 3, 6 — средняя температура всей подложки; 1–3 — подложка размером 50 × 100 мм,
 4–6 — подложка размером 50 × 50 мм.

Цифрами 2 и 5 обозначена температура, усредненная по квадрату 7×7 мм вокруг положения оси сопла. Именно эта температура является наиболее близкой оценкой средней температуры в пятне напыления. Из рис. 6 можно видеть, что она оказывается несущественно ниже, чем температура на оси сопла. Поэтому далее будут рассматриваться только усредненные температуры. Дополнительно на рис. 6 изображено изменение температуры, усредненной по всей подложке. Она оказывается заметно ниже температуры в пятне напыления, особого значения для напыления не имеет и приведена для сравнения.

Можно видеть, что температура в пятне напыления сначала только увеличивается по мере перемещения сопла, но в окрестности заднего края подложки она уменьшается (на последних 15 мм). Этот краевой эффект связан с влиянием маски, которая предохраняет подложку от нагрева, когда струя оказывается в ее окрестности. Чтобы в этом убедиться, был проведен расчет для подложки, имеющей в два раза большую длину. Из рис. 6 видно, что действительно в этом случае температура в пятне напыления продолжает увеличиваться, а ее уменьшение опять наблюдается только в окрестности заднего края подложки. В дальнейших расчетах (рис. 8 и 9) была выбрана длина подложки 65 мм, а сами рассчитанные температуры приведены только до длины 50 мм (т.е. где краевой эффект еще не проявляется).

На рис. 7 показаны распределения температуры по поверхности подложки в моменты времени достижения соплом расстояний 15 мм (*a* и *c*) и 35 мм (*b* и *d*) от переднего края подложки при движении со скоростью 20 мм/с (*a* и *b*) и 200 мм/с (*c* и *d*). Верхние половины рисунков соответствуют подложке толщиной 1 мм, а нижние — 3 мм. Видно, что во всех случаях более толстой подложке и более высокой скорости перемещения сопла соответствуют заметно более низкие температуры. Отметим следующую особенность. На этих рисунках штриховой линией отмечена окружность, которая соответствует положению сопла. Можно видеть, что максимум температуры подложки отстает от положения оси сопла, причем тем сильнее, чем дальше продвигается сопло и чем выше скорость его перемещения. Как видно, толщина подложки не влияет на отставание максимума температуры (по крайней мере, в исследованном диапазоне 1 – 3 мм).

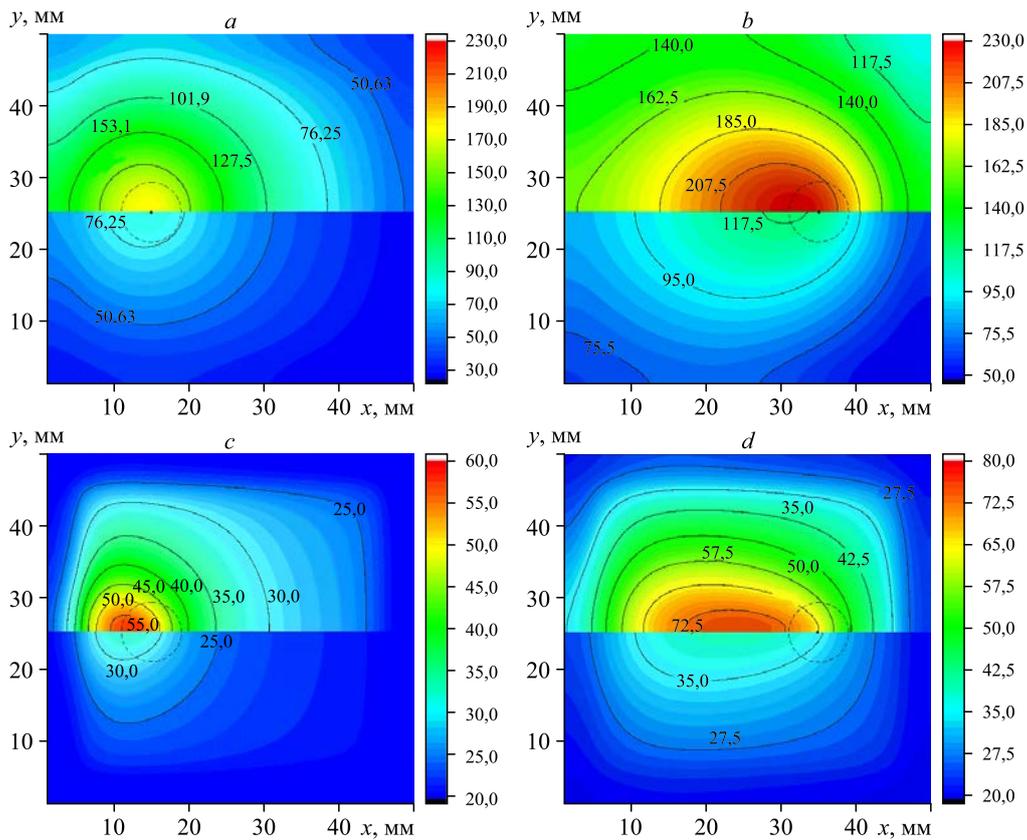


Рис. 7. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) по поверхности подложки в момент времени, когда сопло достигало расстояний 15 мм от переднего края подложки (*a* и *c*) и 35 мм (*b* и *d*) при движении со скоростью 20 мм/с (*a* и *b*) и 200 мм/с (*c* и *d*).

Верхние половины рисунков соответствуют подложке толщиной 1 мм, нижние — 3 мм.

На рис. 8 и 9 показаны зависимости температуры в пятне напыления от положения оси сопла для алюминиевых подложек разной толщины (1 и 3 мм), разной начальной температуры (20, 100, 300 и 350°C) и разной скорости перемещения сопла (20, 50, 100 и 200 мм/с). Видно, что более высоким скоростям перемещения сопла и более толстым

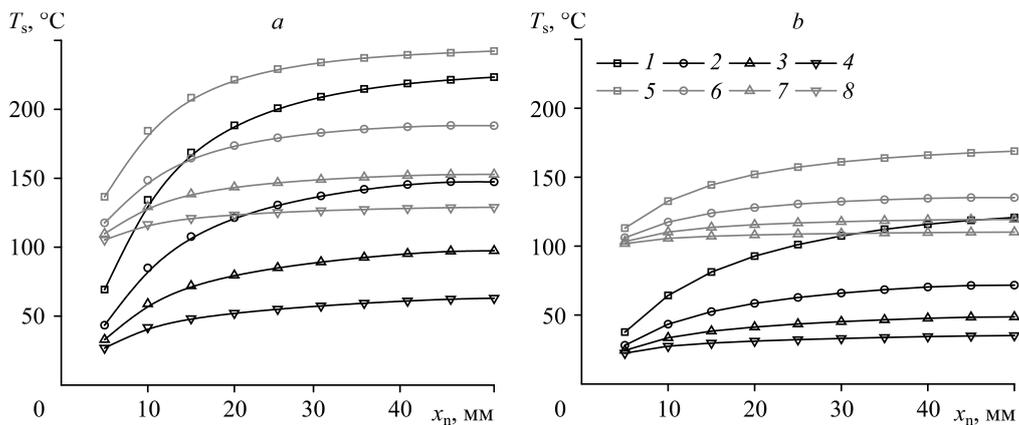


Рис. 8. Зависимость температуры в пятне напыления от положения оси сопла.

Алюминиевая подложка толщиной 1 (*a*) и 3 (*b*) мм; начальная температура подложки 20°C (1–4), 100°C (5–8); скорость перемещения сопла 20 (1, 5), 50 (2, 6), 100 (3, 7), 200 (4, 8) мм/с.

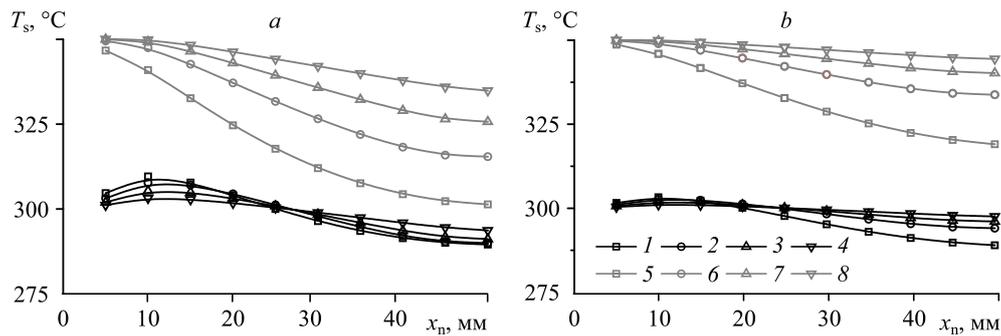


Рис. 9. Зависимость температуры в пятне напыления от положения оси сопла.

Алюминиевая подложка толщиной 1 (а) и 3 (б) мм.

Начальная температура подложки 300 °С (1–4), 350 °С (5–8);

скорость перемещения сопла 20 (1, 5), 50 (2, 6), 100 (3, 7), 200 (4, 8) мм/с.

подложкам соответствуют меньшие изменения температуры подложки в пятне напыления по сравнению с начальным её значением. Особо отметим результаты, представленные на рис. 9. Видно, что при начальной температуре подложки 300 °С реализуется режим, когда изменение температуры в пятне напыления минимально, причем почти независимо от скорости перемещения сопла (в диапазоне 20 – 200 мм/с) и толщины подложки (в диапазоне 1 – 3 мм). При начальной температуре 350 °С происходит охлаждение подложки в пятне напыления несмотря на то, что температура торможения струи (400 °С) еще более высокая. Такой эффект наблюдался в других работах, о чем упоминалось во введении. Объяснить это можно тем, что за счет подмешивания окружающего воздуха, имеющего комнатную температуру, в пристенную струю, ее температура падает и на некотором расстоянии от оси сопла оказывается ниже начальной температуры подложки, т.е. струя начинает охлаждать подложку, а не нагревать ее. Таким образом, показано, что имеется некоторая начальная температура подогрева подложки, при которой реализуется режим напыления с минимальным изменением температуры в пятне напыления. Учет этого факта, как ожидается, позволит улучшить характеристики покрытий.

В настоящей работе рассмотрены сравнительно простые условия: движение сопла один раз и по прямой линии (в отличие от движения по схеме «зигзаг» со смещением на заданный шаг, что часто применяется на практике), отсутствие источников дополнительного подогрева подложки (что реализуется в методе ХГН с поддержкой нагрева подложки лазерным излучением), установка сопла по нормали к поверхности подложки и др. Здесь также не учитывается возможное влияние образующегося покрытия на температуру в пятне напыления, т.е. применимость полученных результатов ограничена малыми толщинами покрытий. Все эти ограничения являются предметом изучения в будущем.

Заключение

В работе представлены результаты исследования эволюции температуры подложки при перемещении сопла в условиях холодного газодинамического напыления. Предложена модель для расчета температуры подложки и проведена ее верификация. Получены расчетные данные в типичных диапазонах изменения скорости перемещения сопла, толщины подложки и ее начальной температуры, которые встречаются на практике напыления. Показано, что имеется оптимальная начальная температура подложки, при которой изменение температуры в пятне напыления минимально.

Список обозначений

T_{sm} — максимальная температура поверхности подложки, °С,	α — коэффициент теплообмена между струей и подложкой, Вт/(м ² ·К),
T_R — комнатная температура, °С,	T_0 — температура торможения струи, °С,
z_{ns} — расстояние от среза сопла до подложки, м,	T_{00} — температура торможения в форкамере, °С,
u_n — скорость перемещения сопла, м/с,	α_0 — коэффициент теплообмена на оси струи, Вт/(м ² ·К),
T_{ij} — температура подложки, °С,	c_s — теплоемкость материала подложки, Дж/(кг·К),
λ_s — теплопроводность подложки, Вт/(м·К),	ρ_s — плотность материала подложки, кг/м ³ ,
h_s — толщина подложки, м,	χ_s — температуропроводность подложки, м ² /с.

Список литературы

1. Papyrin A.H., Kosarev V.F., Klinkov S.V., Alkhimov A.P., Fomin V.M. Cold spray technology. Amsterdam: Elsevier Sci., 2007. 336 p.
2. Шикалов В.С., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Холодное газодинамическое напыление алюминиевого покрытия на эрозионно нестойкий материал // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 5. С. 779–787.
3. Lomovsky O.I., Dudina D.V., Ulianitsky V.Yu., Zlobin S.B., Kosarev V.F., Klinkov S.V., Korchagin M.A., Know D.-H., Kim J.-S., Know Y.-S. Cold and detonation spraying of TiB₂-Cu nanocomposites // Materials Sci. Forum. 2007. Vol. 534–536. P. 1371–1376.
4. Kim J.S., Kwon Y.S., Lomovsky O.I., Dudina D.V., Kosarev V.F., Klinkov S.V., Kwon D.H., Smurov I. Cold spraying of in situ produced TiB₂-Cu nanocomposite powders // Composites Sci. and Technology. 2007. Vol. 67, Iss. 11–12. P. 2292–2296.
5. Kosarev V.F., Klinkov S.V., Sova A.A., Smurov I. Deposition of multicomponent coatings by cold spray // Surf. Coat. Technol. 2008. Vol. 202. P. 5858–5862.
6. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Sova A.A., Smurov I. Calculation of particle parameters for cold spraying of metal-ceramic mixtures // J. Therm. Spray Technol. 2009. Vol. 18. P. 944–956.
7. Sova A.A., Kosarev V.F., Papyrin A.N., Smurov I. Effect of ceramic particle velocity on cold spray deposition of metal-ceramic coatings // J. Therm. Spray Technol. 2011. Vol. 20. P. 285–291.
8. Klinkov S.V., Kosarev V.F. Cold spraying activation using an abrasive admixture // J. Therm. Spray Technol. 2012. Vol. 21. P. 1046–1053.
9. Косарев В.Ф., Полухин А.А., Ряшин Н.С., Фомин В.М., Шикалов В.С. Влияние состава порошковой смеси на коэффициент напыления и свойства Ni + В₄С покрытий ХГН // Механика твердого тела. 2017. № 4. С. 127–134.
10. Фомин В.М., Гольшев А.А., Косарев В.Ф., Маликов А.Г., Оришнич А.М., Ряшин Н.С., Филиппов А.А., Шикалов В.С. Создание гетерогенных материалов на основе порошков В₄С и Ni методом холодного газодинамического напыления с последующим послойным лазерным воздействием // Прикл. мех. и техн. физ. 2017. Т. 58, № 5. С. 218–227.
11. Фомин В.М., Гольшев А.А., Косарев В.Ф., Маликов А.Г., Оришнич А.М., Филиппов А.А. Создание металлокерамических структур на основе Ti, Ni, WC и В₄С с применением технологии лазерной наплавки и холодного газодинамического напыления // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22, № 4. С. 5–15.
12. Klinkov S.V., Kosarev V.F. Monte-Carlo simulation of the cold spray process of mixtures of metal and ceramic powders // Therm. Spray Technol. 2021. Vol. 30. P. 1081–1092.
13. Клинков С.В., Косарев В.Ф., Шикалов В.С., Видюк Т.М. Оптимизация получения методом ХГН нейтронопоглощающих композитных (Al + В₄С) покрытий // Прикл. мех. и техн. физ. 2021. В печати.
14. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод «холодного» газодинамического напыления // ДАН СССР. 1990. Т. 315, № 5. С. 1062–1065.
15. Klinkov S.V., Kosarev V.F. Measurements of cold spray deposition efficiency // J. Therm. Spray Technol. 2006. Vol. 15, No. 3. P. 364–371.
16. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Shikalov V.S. Influence of nozzle velocity and powder feed rate on the coating mass and deposition efficiency in cold spraying // Surf. Coat. Technol. 2019. Vol. 367. P. 231–243.
17. Papyrin A.N., Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Klinkov S.V. Experimental study of interaction of supersonic gas jet with a substrate under cold spray process // Thermal Spray 2001: New Surfaces for A New Millennium / Ed. C.C. Berndt, K.A. Khor, E. Lugscheider. Pub. ASM Intern., Materials Park, OH, 2001. P. 423–431.
18. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F. The features of cold spray nozzle design // J. Therm. Spray Technol. 2001. Vol. 10. P. 375–381.
19. Kosarev V.F., Klinkov S.V., Alkhimov A.P., Papyrin A.N. On some aspects of gas dynamic of the cold spray process // J. Therm. Spray Technol. 2003. Vol. 12. P. 265–281.
20. Kosarev V.F., Klinkov S.V., Papyrin A.N. Supersonic jet/substrate interaction in the cold spray process // The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications / Ed V.K. Champagne. Cambridge: Woodhead Publishing, 2007. P. 178–216.

21. **Klinkov S.V., Kosarev V.F., Zaikovskii V.N.** Influence of flow swirling and exit shape of barrel nozzle on cold spraying // *J. Therm. Spray Technol.* 2011. Vol. 20. P. 837–844.
22. **Sova A., Klinkov S., Kosarev V., Ryashin N., Smurov I.** Preliminary study on deposition of aluminium and copper powders by cold spray micronozzle using helium // *Surf. Coat. Technol.* 2013. Vol. 220. P. 98–101.
23. **Klinkov S.V., Kosarev V.F., Zaikovskii V.N.** Preliminary study of cold spraying using radial supersonic nozzle // *Surface Engng.* 2016. Vol. 32. P. 701–706.
24. **Kiselev S.P., Kiselev V.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Zaikovskii V.N.** Study of the gas-particle radial supersonic jet in the cold spraying // *Surf. Coat. Technol.* 2017. Vol. 313. P. 24–30.
25. **Алхимов А.П., Клишков С.В., Косарев В.Ф.** Исследование взаимодействия двухфазного потока с нагретой поверхностью // *Теплофизика и аэромеханика.* 1998. Т. 5, № 1. С. 67–73.
26. **Fukumoto M., Wada H., Tanabe K., Yamada M., Yamaguchi E., Niwa A., Sugimoto M., Izawa M.** Effect of substrate temperature on deposition behavior of copper particles on substrate surface in the cold spray process // *J. Therm. Spray Technol.* 2007. Vol. 16. P. 643–650.
27. **Rech S., Trentin A., Vezzu S., Legoux J.G., Irissou E., Guagliano M.** Influence of pre-heated al 6061 substrate temperature on the residual stresses of multipass al coatings deposited by cold spray // *J. Therm. Spray Technol.* 2011. Vol. 20. P. 243–251.
28. **Suo X.K., Yu M., Li W.Y., Planche M.P., Liao H.L.** Effect of substrate preheating on bonding strength of cold-sprayed Mg coatings // *J. Therm. Spray Technol.* 2012. Vol. 21. P. 1091–1098.
29. **Yin Sh., Suo X., Guo Zh., Liao H., Wang X.** Deposition features of cold sprayed copper particles on preheated substrate // *Surf. Coat. Technol.* 2015. Vol. 268. P. 252–256.
30. **Ernst K.-R., Braeutigam J., Gaertner F., Klassen T.** Effect of substrate temperature on cold-gas-sprayed coatings on ceramic substrates // *J. Therm. Spray Technol.* 2013. Vol. 22. P. 422–432.
31. **Watanabe Y., Yoshida Ch., Atsumi K., Yamada M., Fukumoto M.** Influence of substrate temperature on adhesion strength of cold-sprayed coatings // *J. Therm. Spray Technol.* 2015. Vol. 24. P. 86–91.
32. **Legoux J.G., Irissou E., Moreau C.** Effect of substrate temperature on the formation mechanism of cold-sprayed aluminum, zinc and tin coatings // *J. Therm. Spray Technol.* 2007. Vol. 16. P. 619–626.
33. **King P.C., Bae G., Zahiri S.H., Zahedi M., Lee Ch.** An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates // *J. Therm. Spray Technol.* 2010. Vol. 19. P. 620–634.
34. **Yin Sh., Wang X., Li W., Guo X.** Examination on substrate preheating process in cold dynamic spraying // *J. Therm. Spray Technol.* 2011. Vol. 20. P. 852–859.
35. **Li W., Yin S., Guo X., Liao H., Wang X., Coddet C.** An investigation on temperature distribution within the substrate and nozzle wall in cold spraying by numerical and experimental methods // *J. Therm. Spray Technol.* 2012. Vol. 21, No. 1. P. 41–48.
36. **Yin Sh., Wang X., Li W., Li Y.** Numerical study on the effect of substrate size on the supersonic jet flow and temperature distribution within the substrate in cold spraying // *J. Therm. Spray Technol.* 2012. Vol. 21, No. 3–4. P. 628–635.
37. **Yin Sh., Sun Y., Wang X., Guo Zh., Liao H.** Effect of spray angle on temperature distribution within the metallic substrate in cold spraying // *J. Therm. Spray Technol.* 2013. Vol. 22, No. 6. P. 983–991.
38. **Ryabinin A.N., Irissou E., McDonald A., Legoux J.-G.** Simulation of gas-substrate heat exchange during cold-gas dynamic spraying // *Int. J. Therm. Sci.* 2012. Vol. 56. P. 12–18.
39. **McDonald A.G., Ryabinin A.N., Irissou E., Legoux J.-G.** Gas-substrate heat exchange during cold-gas dynamic spraying // *J. Therm. Spray Technol.* 2013. Vol. 22, No. 2–3. P. 391–397.
40. **Kulmala M., Vuoristo P.** Influence of process conditions in laser-assisted low-pressure cold spraying // *Surf. Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. P. 4503–4508.
41. **Danlos Y., Costil S., Guo X., Liao H., Coddet C.** Ablation laser and heating laser combined to cold spraying // *Surf. Coat. Technol.* 2010. Vol. 205. P. 1055–1059.
42. **Lupoi R., Sparkes M., Cockburn A., O'Neill W.** High speed titanium coatings by supersonic laser deposition // *Mater. Lett.* 2011. Vol. 65. P. 3205–3207.
43. **Zahiri S.H., Phan T.D., Masood S.H., Jahedi M.** Development of holistic three-dimensional models for cold spray supersonic jet // *J. Therm. Spray Technol.* 2014. Vol. 23, No. 6. P. 919–933.
44. **Chen Ch., Xie Y., Verdy Ch., Huang R., Liao H., Ren Zh., Deng S.** Numerical investigation of transient coating build-up and heat transfer in cold spray // *Surf. Coat. Technol.* 2017. Vol. 326. P. 355–365.
45. **Шикалов В.С., Клишков С.В., Косарев В.Ф.** Влияние температуры газа и скорости перемещения сопла на коэффициент напыления при ХГН // *Теплофизика и аэромеханика.* 2021. Т. 21, № 1. С. 79–88.
46. **Алхимов А.П., Клишков С.В., Косарев В.Ф.** Исследование теплообмена сверхзвуковой плоской струи с преградой в условиях газодинамического напыления // *Теплофизика и аэромеханика.* 2000. Т. 7, № 3. С. 389–396.

*Статья поступила в редакцию 18 марта 2021 г.,
после доработки — 18 марта 2021 г.,
принята к публикации 18 мая 2021 г.*