

# Метод, который нужен

25 февраля 2011 года большой группе учёных была присуждена премия Правительства Российской Федерации — с формулировкой «за создание обобщенной теории взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с преградой, разработку технологий и оборудования для газодинамического напыления металлов, широкомасштабно используемых в мировой практике».

Список лауреатов обширен, но мы встретились с теми учёными, которые, можно сказать, стояли у истоков этой работы — директором Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН академиком В.М. Фоминым, руководителем работы, и сотрудниками института: д.т.н., профессором, г.н.с. А.П. Алхимовым, д.ф.-м.н., заведующим лабораторией физики многофазных сред В.Ф. Косаревым, к.ф.-м.н., с.н.с. С.В. Клиновым и победителями с ними о том, что же представляет собой холодное газодинамическое напыление. Ещё один награждённый, д.ф.-м.н., профессор, бывший заведующий лабораторией А.Н. Папырин принял участие в разговоре не мог, так как в настоящее время живёт и работает в США.

Работа основана на явлении, которое было открыто в ИТПМ около 30 лет назад и которое позже было названо «холодным газодинамическим напылением», — рассказывает В.М. Фомин. — В цикл входят также те работы, которые проводились в МВТУ им. Н.Э. Баумана, только там, при сходных идеях, используется не холодный поток, а тёплый, что увеличивает скорость движения частиц. В команде были представители Объединённого института высоких температур РАН, занимающиеся процессами эрозии, а также ООО «Обнинский центр порошкового напыления», который выпускает установки, основанные на методе газодинамического напыления.

Суть явления состоит в том, что металлическое покрытие образуется при соударении холодных (с температурой, существенно меньшей температуры плавления) металлических частиц, которые ускоряются сверхзвуковым газовым потоком до скорости нескольких сот метров в секунду, с поверхностью обрабатываемой детали. Сплошной слой из плотно упакованных металлических частиц формируется благодаря тому, что нерасплавленные металлические частицы, ударяясь о подложку, претерпевают пластическую деформацию, а их кинетическая энергия преобразуется в тепло и частично в энергию связи с подложкой.

По словам Василия Михайловича, газодинамическое напыление отличается от плазменного, магнетронного или детонационного отсутствия высоких температур в процессе формирования металлических покрытий, а следовательно, и отсутствием окисления материалов частиц и основы. Каждая технология имеет свою область применения, поэтому другие методы напыления в некоторых случаях имеют преимущество перед методом ХГН, который развивался в первую очередь для создания различных антикоррозионных покрытий, а сейчас имеет широкое распространение и позволяет получать материалы с новыми свойствами, которых иногда нет в природе.

## Как было вначале

Открытие было сделано в процессе решения военной задачи. Вот что рассказал об этом ак. В.М. Фомин:

— Задача была очень простой. В начале 80-х гг. появились крылатые ракеты. Летели они очень быстро, их трудно было засечь радаром. Когда радар схватывал цель, ракета оказывалась уже буквально над головой. Кто же будет сбивать ракету при такой диспозиции, чтобы получить взрыв ядерного заряда в непосредственной близости? Приходилось их пропускать. У нас в стране придумали следующее: крылатую ракету не сбивали, а выслали навстречу другую ракету. Она взрывалась, распадаясь на мелкие части, и когда крылатая ракета входила в облако частиц, они производили эрозию её оболочки. В результате этой эрозии нарушалась симметрия атомного заряда, и он не взрывался.

Мы занимались преимущественно эрозией. При изучении поведения частиц в сверхзвуковом газовом потоке при соударении с твёрдым телом и был открыт метод ХГН. Можно сказать, что случайно — открытие по заказу не получается.

— Наша первоначальная группа — я и А.Н. Папырин — вначале занималась объектами летательных аппаратов в запыленной атмосфере, — вспоминает А.П. Алхимов. — Именно в процессе этой работы было открыто явление холодного напыления, а также второе очень интересное явление — образование отрывных зон частицами, которые при соударении с объектом телом отражались и выходили за пределы ударной волны, образуя перед собой ударную волну, если сверхзвуковой поток обтекает его. Ещё один важный момент, который позже внёс существен-

ные коррективы в процесс исследования, — это выявление адгезивно-эрозионного перехода. В своих исследованиях, к которым позже подключились В.Ф. Косарев, С.В. Клинов, а теоретическую часть которых вёл В.М. Фомин с коллегами, мы показали, что процесс сверхзвукового взаимодействия двухфазных потоков является комплексным: при низких скоростях идёт эрозионное разрушение преграды, при более высоких, критических, идёт процесс образования так называемых холодных покрытий. Следует пояснить термин: в инженерной практике есть установившееся предствление, что если температуры деформации материалов ниже температуры рекристаллизации, то такие процессы называются холодными, поэтому мы здесь не были оригинальными и, используя такие классические представления об обработке материалов, отнесли этот метод к холодному газодинамическому.

Лаборатория, которой в настоящее время руководит В.Ф. Косарев, создавалась специально для экспериментальных исследований в области процессов, связанных с ХГН.

**В.Ф. Косарев:** Мы изучаем различные аспекты напыления, которое у нас называется «холодным газодинамическим», а на Западе — Cold Spray, занимаемся вопросами газодинамики этого процесса, взаимодействия холодных частиц с преградой — их деформацией, закреплением, эрозией, а также отработкой технологии, основанных на холодном напылении, выясняя, как процесс зависит от скорости частиц, от вида газа, от его температуры. Исследования были начаты более 25 лет назад, и до сих пор мы работаем с этой проблемой, так как она поистине неисчерпаема. Понять, что происходит в процессе на атомном уровне и почему — это пока мечта.

## Как это делается

Как работает установка для холодного газодинамического напыления, объяснил В.Ф. Косарев:

— Установка представляет собой сопло, где с помощью газа под средним давлением создаётся сверхзвуковой поток. В форкамеру при низких температурах вводятся частицы, которые разгоняются до высоких скоростей, выше, чем в других термических методах (примерно 600—800 м/сек.). Частицы с высокой скоростью ударяются о поверхность подложки, деформируются и закрепляются. Кроме соплового узла, есть дозатор частиц, который должен регулировать подачу частиц в форкамеру, есть подогреватель газа — это создано для того, чтобы регулировать скорость истечения. Мы подогреваем газовый поток, но так, чтобы температура частиц была далека от температуры плавления.

Так регулируются температура и скорость частиц перед ударом. Температура сама тоже влияет на процесс. Если разогнать частицы в форкамере при комнатной температуре, то в сверхзвуковом потоке температура падает, и тогда частицы подлетают к подложке с собственной температурой около минус ста градусов. Если же мы подогреваем газовый поток на 200—300 градусов, то частицы подлетают к подложке при температуре, равной комнатной.

Дальше они попадают в камеру напыления, где часть частиц не прилипает к подложке, оказавшись на периферии струи, или попадает мимо подложки. Эти частицы надо собрать и сепарировать. А так как они не прошли стадию плавления, испарения и иных модификаций, их можно использовать повторно.

В установках мы пользуемся обычным воздухом. Однако можно использовать и гелий, тогда скорость истечения будет выше, а качество покрытия — лучше, но обойдётся это намного дороже.

## Практическое применение

Метод ХГН получил широкое распространение как в России, так и за рубежом. По словам ак. В.М. Фомина, несмотря на то, что ИТПМ некоторое время сопротивлялся «самопроизвольному» распространению метода, воспретивать этому было невозможно:

— Было ясно, что достигнут тот уровень, когда метод ХГН начал распространяться у нас в стране. Надо отдать должное А.Н. Папырину — благодаря тому, что он в своё время уехал в Америку, где развернул пропаганду нашего метода, последний стал известен в мире и используется очень активно. Наши работы вышли на тот уровень, когда возникла необходимость изготавливать оборудование. Однако было понятно, что сам институт его делать не может — мы могли изготовить



максимум десятков образцов. Но в это время начали появляться фирмы, которые, отдавая должное ИТПМ, тоже начали заниматься холодным газодинамическим напылением, но не исследованием, а именно изготовлением оборудования, его продажей и обучением работе на нём. Мы поняли, что сопротивляться жизни невозможно, и решили с этими фирмами сотрудничать. Они охотно идут на это, правда, пока заказов нам не делают. Но в дальнейшем, возможно, им понадобятся наши научные разработки.

Действительно, возможности практического применения метода ХГН если не безграничны, то весьма и весьма обширны. Это не только авиация, как принято считать.

**В.М. Фомин:** В первую очередь следует вспомнить об адгезии. Например, вам надо защитить металлическую конструкцию от влаги. Вы поставляете её куда-нибудь в Индию, в Китай, где очень влажно, и всё это чревато коррозией. Для защиты от неё можно конструкцию покрасить. Через год придётся красить снова. Конструкцию можно оцинковать. Но для этого надо иметь ванну, производить операции, «грязные» с точки зрения экологии и небезопасные для здоровья человека. А можно покрыть конструкцию алюминием с помощью ХГН. Алюминий немного окислится и будет стоять вечно.

**В.Ф. Косарев:** Очень продуктивен метод ХГН при нанесении токопроводящих покрытий. Процесс идёт при низкой температуре, и в отличие от всех методов термического напыления не происходит окисления материала. Поэтому напыление, например, медных покрытий позволяет получать покрытие с процентом окислов, практически равным нулю. Это очень важно, скажем, при нанесении покрытий на керамические подложки для силовой электроники.

Ак. В.М. Фомин упомянул научно-производственный комплекс «Сибирская керамика», занимающийся, среди прочих работ, как раз нанесением медного слоя на керамику. Пока что, по словам Василия Михайловича, это получается «грязно и дорого», но если удастся в этой области применить метод ХГН, на что он очень надеется, комплекс будет производить продукцию для всей страны. Вспомнил академик и о предложении, которое делалось учёными железной дороге. Известно, что провода и токоёмники электропоездов изнашиваются от трения, и их приходится регулярно менять. Но если в медь, из которой они сделаны, добавить примерно 5% тефлона, то в электрических свойствах система тоже потеряет около пяти процентов, однако износоустойчивость увеличится бы на два порядка. Никаким другим способом тефлон на медь не нанести — при, например, плазменном напылении он сгорит. Увы, понимания у железнодорожного начальства учёные не нашли. Видимо, это дело будущего. Но много делается уже сейчас. Скажем, известен случай, когда в атомном реакторе методом ХГН удалось заварить трещину в трубе, поскольку человека из-за высокого уровня радиации туда пустить невозможно. Как любая хорошая фундаментальная научная работа, метод ХГН найдёт много самых различных приложений в будущем.

## Безопасность метода

С экологической точки зрения метод ХГН также имеет ряд преимуществ. Напыление можно производить в специальной камере, причём те частицы напыляемого вещества, которые не попали на обрабатываемую основу, можно собрать и использовать повторно (разумеется, чем они крупнее, тем проще это сделать, тогда как со сбором наночастиц возникают проблемы).

**А.П. Алхимов:** Если сравнить ХГН, например, с термоспреем, то основная экологическая опасность состоит в том, что частицы, которые вводятся для напыления, нагреваются до высоких температур, и при температуре плавления паровая фаза представляет опасность и для операторов на производстве, и для окружающей среды. При плазменном напылении температура струи может достигать 20 тыс. градусов, и тепловое и оптическое излучения оказывают вредное воздействие на зрение. При горячем цинковании или алитировании (покрытии алюминиием в расплавленном состоянии) идёт интенсивный процесс химической подготовки. Необходимы травление, промывка водой и ряд других технологических операций, после которых остаются химические продукты, накапливаемые в огромных резервуарах. Типичный пример — Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина, где стоят гигантские ёмкости, над ними поднимаются вредные испарения, и штрафы, которые накладывают экологические комиссии, соизмеримы с теми выгодами, которые завод получает от горячего цинкования труб. Вот поэтому в плане экологической чистоты ХГН не имеет конкурентов.

Кроме того, ХГН оказывает минимальное силовое и тепловое воздействие на материал. Это единственный щадящий метод при реставрации предметов старины, художественных изделий и т.п. Заинтересованные в этом люди есть, и некоторые вещи в Петербурге уже отреставрированы с помощью нашего метода — например, люстра в Таврическом дворце.

Есть примеры применений метода ХГН и в космонавтике. Об этом наши собеседники говорили мало, упомянув некую крупную американскую фирму, которая пыталась на двигателе делать теплоотводящие слои, придя к выводу, что лучший метод в этом случае — именно ХГН. Очень быстро открытые публикации на эту тему сошли на нет — видимо, американцы достигли этапа внедрения технологий, и процесс был засекречен. Имеется патент, основанный на применении технологии ХГН у Государственного космического научно-производственного центра имени М.В. Хруничева. В целом же космические технологии до сих пор остаются предметом, не обсуждающимся широко, по причинам вполне понятным.

Установки, в которых используется ХГН, производятся в Германии и во Франции, а в России, к сожалению, такое производство слабо развито. Активно осваивает этот метод и Китай. Как говорит ак. В.М. Фомин, остановить это невозможно — останавливается только то, что никому не нужно. Метод ХГН, как оказалось, нужен всем, и возможности его ещё далеко не исчерпаны.

Мария Горынцова, «НБС»  
Фото Ю. Плотникова