



ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЯХ ВО ВРЕМЯ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Чл.-кор. НАН Украины **В. И. ПОХМУРСКИЙ**, **М. М. СТУДЕНТ**, **В. М. ДОВГУНЫК**,
И. И. СИДОРЯК, кандидаты техн. наук, **Ю. В. ДЗЬОБА**, инж.
 (Физико-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины, г. Львов),
И. А. РЯБЦЕВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

При электродуговом нанесении покрытий из порошковых проволок возникают остаточные напряжения растяжения, которые могут вызывать появление трещин в покрытиях и их разрушение, особенно при финишных операциях. Показано, что режимы нанесения покрытий существенно влияют как на кинетику формирования внутренних напряжений, так и на их остаточный уровень.

Ключевые слова: электродуговое напыление, покрытие, порошковая проволока, режим нанесения покрытия, внутреннее напряжение, когезия, разрезное кольцо

Электродуговые покрытия из порошковых проволок (ПП) системы легирования Fe–Cr–B–Al, отличающиеся износостойкостью в условиях граничного трения, широко применяют в промышленности для восстановления изношенных деталей машин типа вал и защиты от абразивного изнашивания при нормальных и повышенных температурах радиационных труб и труб экономайзеров тепловых электростанций. При электродуговом нанесении покрытий путем распыления расплава ПП в них возникают остаточные напряжения растяжения, которые могут стать причиной появления трещин и разрушений, особенно при финишных операциях.

Режимы нанесения покрытий существенно влияют как на кинетику формирования внутренних напряжений, так и на их остаточный уровень. Покрытия преимущественно разрушаются под действием напряжений первого рода, которые уравниваются в их объеме. Влияние режимов напыления на формирование напряжений и их остаточное значение является предметом нашего исследования.

Методика эксперимента. Внутренние напряжения в покрытиях оценивали по методике разрезных колец (рис. 1) [1–3], которая позволяет определить напряжения в процессе формирования и охлаждения покрытий до комнатной температуры по изменению расстояния между торцами разрезного кольца. В соответствии с данной методикой к торцам разрезного кольца 1 диаметром 60 мм, высотой 20 мм, толщиной 4 мм приваривали продлевающие стержни 2 с внутренними пазами, которые надежно фиксируют тензодатчик

3, защищенный экраном 4. Покрытия наносили на внешнюю поверхность разрезного кольца 1 с использованием ПП ФМИ-2. Скорость вращения кольца при формировании покрытия составляла 40 мин^{-1} (рис. 2). В качестве материалов шихты ПП применяли феррохромбор ФХБ-2 (60 %) и алюминиевый порошок ПА-40 (40 %). Диаметр ПП составлял 1,8 мм, коэффициент заполнения шихтой — 20 %.

Окружные и радиальные напряжения в покрытии (рис. 3) рассчитывали по формулам [1]:

$$\sigma_{\text{окр}} = r_2^2 p (1 + r_1^2 / \rho^2) / (r_1^2 - r_2^2);$$

$$\sigma_r = r_2^2 p (1 - r_1^2 / \rho^2) / (r_1^2 - r_2^2),$$

где r_1, r_2 — соответственно внешний и внутренний радиусы напыленного слоя; p — контактное дав-

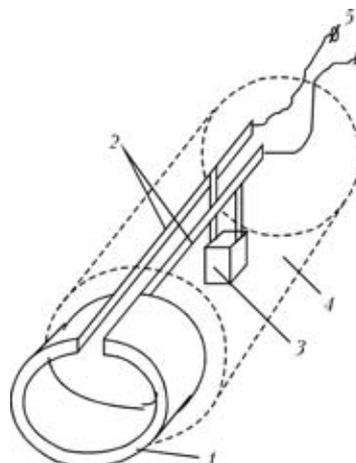


Рис. 1. Схема измерения внутренних напряжений в покрытии в процессе его формирования: 1 — разрезное кольцо (образец); 2 — продлевающие стержни; 3 — тензодатчик; 4 — защитный экран; 5 — выводы на прибор

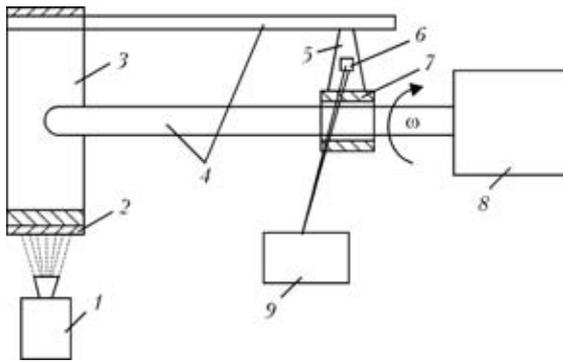


Рис. 2. Схема измерения напряжений в покрытии в процессе его формирования: 1 — электродуговой металлатор; 2 — покрытие; 3 — разрезное кольцо; 4 — продлевающие стержни; 5 — балка; 6 — тензодатчик; 7 — корпус; 8 — электродвигатель; 9 — регистрирующее устройство; ω — окружная скорость

ление, создаваемое покрытием; ρ — расстояние от центра кольца до определенной точки.

Максимальные окружные напряжения, возникающие на внутренней поверхности напыленного слоя, которые непосредственно контактируют с поверхностью кольца (при $\rho = r_2$), рассчитывали по формуле из работы [1]:

$$\sigma_{\text{окр}}^{\text{max}} = p(r_1^2 + r_2^2)/(r_1^2 - r_2^2).$$

Радиальные напряжения, возникающие в любой точке поверхности (рис. 4), $\sigma_r = -p$. Контактное давление p , возникающее под действием напыленного слоя, определяли из выражения

$$p = E\Delta_{km}/(12r_{\text{ср}}^4/t^3)(\lambda + \mu) - (r_{\text{ср}}^2/t)(\eta - \mu),$$

где E — модуль упругости материала кольца; Δ_{km} — ширина реза между торцами кольца; $t = r_1 - r_2$ — толщина кольца; $r_{\text{ср}}$ — средний радиус напыленного слоя;

$$\lambda = \cos(\varphi_0/2)(3\pi - 1,5\varphi_0 + 2\sin\varphi_0 - 0,25\sin 2\varphi_0);$$

$$\mu = \sin(\varphi_0/2)(1 - \cos\varphi_0 + 0,5\sin^2\varphi_0);$$

$$\eta = \cos(\varphi_0/2)(-\pi + 0,5\sin\varphi_0 + 0,25\sin 2\varphi_0),$$

φ_0 — угол раскрытия кольца после разрезки.

С помощью усовершенствованной нами методики можно следить за уровнем внутренних напряжений в покрытии на всех этапах формирования последнего и оптимизировать технологические параметры электродуговой металлизации — давление сжатого воздуха, дистанцию напыления и оптимальную толщину покрытия.

Формирование напряжений в покрытии во время нанесения. Изменение значения максимальных окружных напряжений в процессе нанесения электродуговых покрытий (см. рис. 2) исследовали на стальных разрезных кольцах и вели непрерывную запись изменения ширины реза Δ_{km} . Электрометаллизатор при этом находился в не-

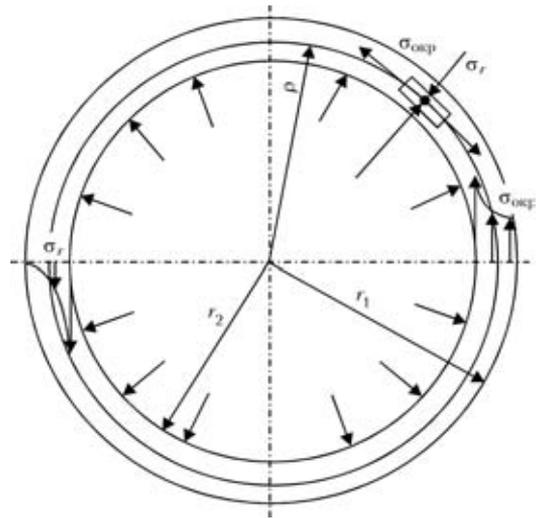


Рис. 3. Схема распределения напряжений в напыленном слое покрытия [1]

подвижном состоянии. Диаметр пятна напыления на расстоянии 100 мм составлял 35 мм и полностью перекрывал напыляемое кольцо шириной 20 мм, скорость перемещения пятна напыления по периметру кольца при скорости его вращения 40 мин^{-1} составляла 13 мм/с. Установлено, что во время напыления в покрытиях возникают внутренние напряжения растяжения, которые увеличиваются при напылении первого слоя (рис. 5). Нанесение последующих слоев приводит к уменьшению растягивающих напряжений, поскольку каждый следующий напыленный слой наносится на предыдущий с более высокой температурой, чем кольцо. Кроме того, напыленный материал имеет меньшую теплопроводность по сравнению со стальной подложкой. В результате каждый последующий напыленный слой охлаждается медленнее и в нем формируются меньшие растягивающие напряжения.

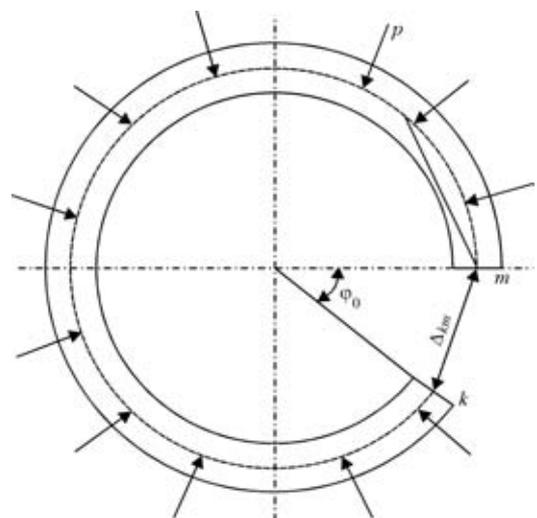


Рис. 4. Схема возникновения внутренних напряжений во время нанесения покрытия на внешнюю поверхность разрезного кольца [1] (m, k — торцевые плоскости разрезного кольца)

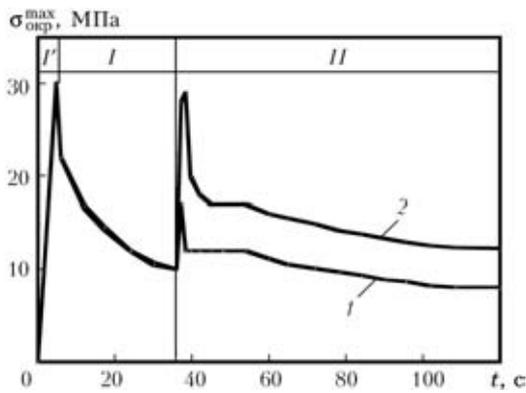


Рис. 5. Изменение максимальных окружных напряжений $\sigma_{окр}^{max}$ в покрытии из ПП ФМИ-2 при напылении (I), охлаждении (II) спокойным (I) и сжатым (2) воздухом: I' — напыление первого слоя; $U_d = 32$ В; $I_{св} = 150$ А; $p = 0,6$ МПа; дистанция напыления $L = 100$ мм

Для установления характера изменения напряжений после напыления кольца с покрытиями охлаждали спокойным и сжатым ($p = 0,6$ МПа) воздухом. На рис. 5 видно, что при охлаждении покрытия сжатым воздухом окружные напряжения растяжения в них увеличиваются скачкообразно вследствие быстрого охлаждения поверхностного слоя. При охлаждении на спокойном воздухе также имеет место скачок напряжений, но гораздо меньший.

При последующем охлаждении покрытия до комнатной температуры на спокойном воздухе фиксируется наличие лишь остаточных напряжений растяжения. При резком и быстром охлаждении сжатым воздухом уровень напряжений больше, чем при охлаждении на спокойном воздухе.

Очевидным является то, что при увеличении времени непрерывного напыления получаем покрытие большей толщины. При этом общая температура кольца также увеличивается. В случае длительного непрерывного напыления скачок окружных напряжений растяжения в покрытии во

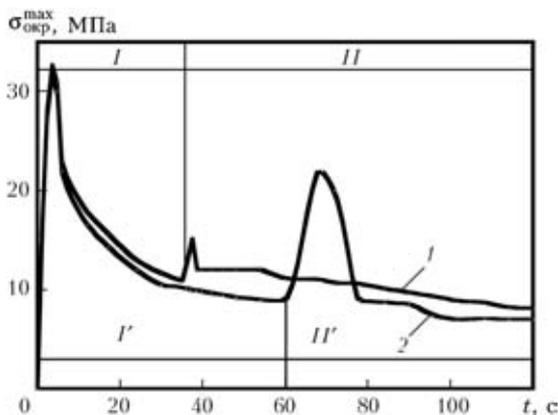


Рис. 6. Изменение максимальных окружных напряжений $\sigma_{окр}^{max}$ в покрытии из ПП ФМИ-2 при напылении в течение 30 (1) и 60 с (2): I, I' — процесс напыления; II, II' — охлаждение на спокойном воздухе

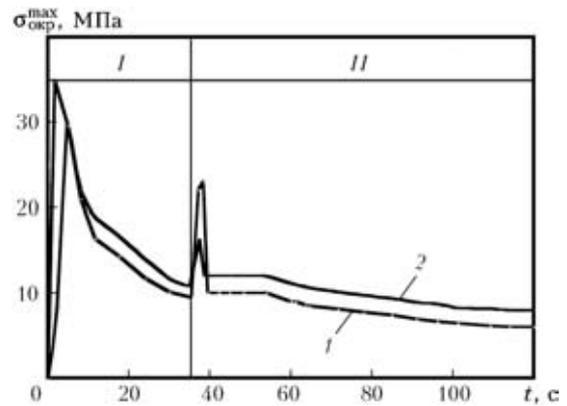


Рис. 7. Изменение максимальных окружных напряжений в покрытии из ПП ФМИ-2 при разной мощности: I — напыление; II — охлаждение на спокойном воздухе; 1 — $I_{св} = 100$; 2 — 200 А; остальные параметры режима напыления см. на рис. 5

время охлаждения выше, а уровень остаточных напряжений ниже (рис. 6).

При увеличении мощности дуги за одно и то же время формируется покрытие, имеющее большую толщину. Температура кольца увеличивается, и скачок значения окружных напряжений растяжения, обусловленный охлаждением, намного выше, чем при дуге меньшей мощности (рис. 7). Остаточные напряжения, наоборот, с увеличением мощности дуги уменьшаются.

Влияние режимов напыления на когезию и остаточные напряжения. При исследовании покрытия формировали электродуговым металлизатором послойно путем перемещения его параллельно поверхности напыления со скоростью 4,5 м/с (см. рис. 2). Покрытия толщиной 1 мм формировались за 10 проходов.

Установлено, что при повышении давления распыляющего воздуха от 0,35 до 0,80 МПа максимальные окружные напряжения растяжения возрастают с 3,5 до 8,0 МПа. Вместе с тем, прочность покрытий на разрыв увеличивается с 50 до 100 МПа (рис. 8). При более высоком давлении

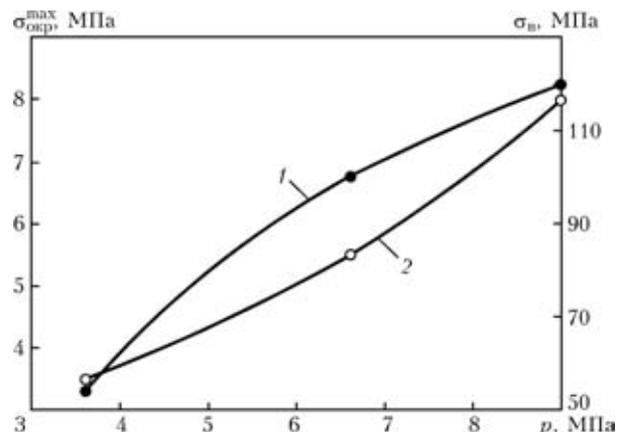


Рис. 8. Влияние давления сжатого воздуха на когезию (1) и остаточные напряжения (2): $U_d = 32$ В; $I_{св} = 150$ А; $L = 100$ мм; толщина покрытия $\delta = 1$ мм

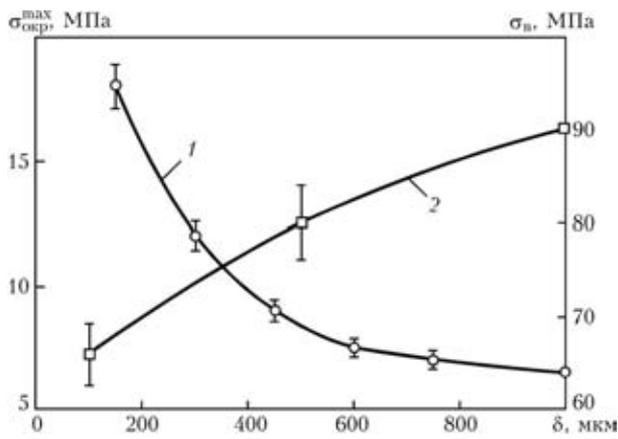


Рис. 9. Влияние толщины δ покрытия на остаточные напряжения растяжения (1) и когезию (2): $I_{св} = 150$ А; остальные параметры режима напыления см. на рис. 5

сжатого воздуха расплав ПП диспергируется интенсивнее и скорость полета расплавленных частиц возрастает, что приводит к увеличению когезионных характеристик покрытия, поскольку скорость остывания мелкодисперсных (приблизительно 50 мкм) капель выше. В то же время покрытия, сформированные из капель большего размера, имеют меньший уровень растягивающих напряжений и релаксация их происходит дольше.

Определено, что остаточные напряжения в покрытии также в значительной мере зависят от толщины δ последнего. Так, при $\delta = 200$ мкм $\sigma_{окр}^{max} = 18$ МПа, а при $\delta = 1000$ мкм $\sigma_{окр}^{max} = 7$ МПа. Поскольку при формировании покрытия каждый последующий напыленный слой имеет более высокую температуру, чем предыдущий, теплопроводность напыленного материала намного меньше, чем подложки. Эти две причины предопределяют, что с увеличением толщины покрытия контактная температура возрастает в момент удара капли о поверхность. Покрытие охлаждается медленнее и полнее проходит релаксация напря-

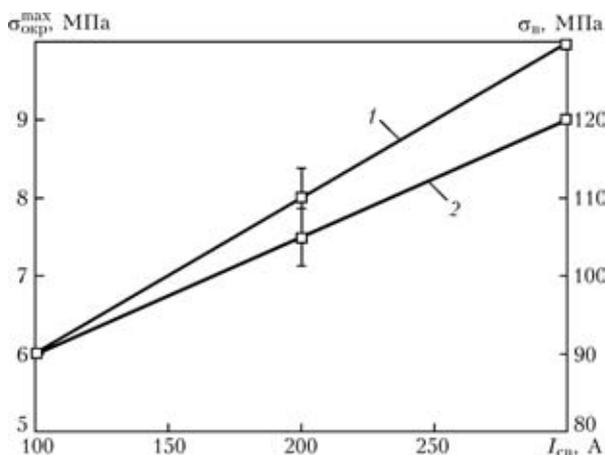


Рис. 10. Влияние сварочного тока $I_{св}$ на когезию (1) и остаточные напряжения (2) в покрытии: $U_d = 32$ В; $p = 0,6$ МПа; $L = 100$ мм; $\delta = 1$ мм

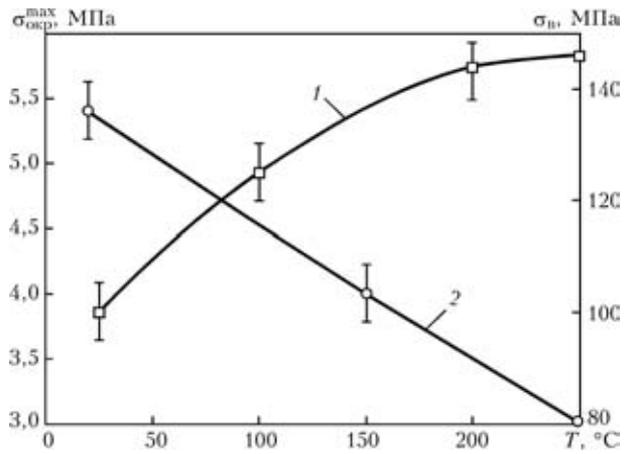


Рис. 11. Влияние температуры T нагрева подложки на когезию (1) и остаточные напряжения (2) в покрытии: $I_{св} = 150$ А; остальные параметры режима см. на рис. 10; $\delta = 1$ мм

жений. За счет этого повышается когезия каждого последующего слоя и, как следствие, увеличивается прочность на разрыв всего покрытия. При $\delta = 200$ мкм прочность на разрыв составляет $\sigma_B = 70$ МПа, а при $\delta = 1000$ мкм $\sigma_B = 90$ МПа (рис. 9).

При нанесении покрытий на тело вращения происходит циклический нагрев и охлаждение его поверхностных слоев. Частые циклы нагрева и охлаждения способствуют возникновению в покрытиях напряжений меньшего уровня.

Показано, что на остаточные напряжения в покрытиях оказывает влияние также производительность процесса напыления. При более высокой производительности напыления, но одинаковой толщине покрытий в них возникают более значительные остаточные напряжения (рис. 10).

Известно, что самым эффективным способом повышения когезии покрытий и уменьшения в нем уровня остаточных напряжений растяжения является подогрев детали непосредственно перед напылением. Нагрев разрезного кольца до 250 °С способствует снижению остаточных напряжений растяжения в покрытии на 50 % и возрастанию его прочности на разрыв от 100 до 144 МПа (рис. 11), поскольку капли металлического расплава на подогретой подложке кристаллизируются и остывают медленнее. В результате релаксация напряжений растяжения протекает полнее, чем в тех случаях, когда капли кристаллизируются на холодной подложке. В то же время нагрев подложки способствует повышению температуры при контакте, возникающем при ударе капли, и обеспечивает повышение адгезии покрытия.

Влияние предыдущей и заключительной дробеструйной обработок на напряженное состояние в покрытии. Поскольку технология нанесения электродуговых покрытий включает предварительную дробеструйную обработку поверхности, то после такой обработки определяли рас-

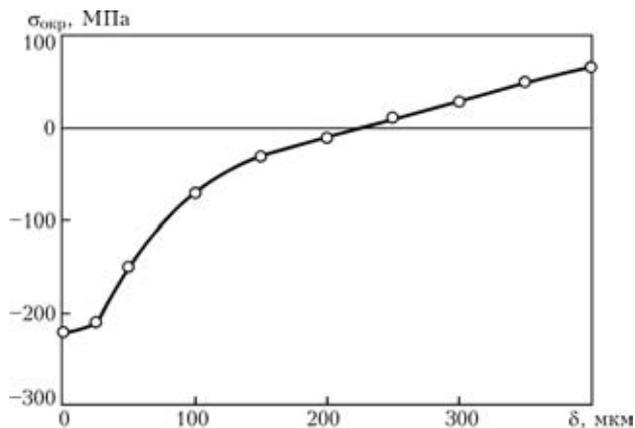


Рис. 12. Распределение напряжений в поверхностном слое в образце из стали Ст3 без покрытия после дробеструйной обработки

пределение напряжений в поверхностных слоях напыленного металла. На рис. 12 показано, что в этих слоях на глубину до 200 мкм формируются напряжения сжатия, максимальные значения которых достигают 200 МПа на поверхности покрытия.

Распределение напряжений по толщине покрытия после напыления представлено на рис. 13 (кривая 1). Как видно из рисунка, по всей его толщине напряжения растяжения одинаковы (приблизительно 12 МПа). На границе раздела покрытие–подложка имеет место резкий скачок напряжений сжатия (около 200 МПа), а затем происходит дальнейшее уменьшение их значений на глубине до 100 мкм с последующим переходом в напряжения растяжения.

Чтобы уменьшить напряжения растяжения в напыленном слое его подвергали дробеструйной обработке корундом (размер частиц 1...2 мм, $p = 0,6$ МПа, время обработки 30 с). Выявлено, что дробеструйная обработка действует на напыленный слой так же, как на сплошной материал, т. е. после абразивной обработки корундом в покрытии формируются напряжения сжатия, максимальное значение которых составляет 180 МПа на поверхности покрытия (кривая 2 на рис. 13). При принятых режимах влияние такой дробеструйной обработки проявляется при толщине покрытия до 150 мкм, при этом значения напряжений растяжения обработанного и необработанного образцов совпадают. Кроме того, влияние такой обработки распространяется и на переходную зону покрытие–подложка. В покрытии со стороны подложки также формируются напряжения сжатия. Такое перераспределение напряжений приводит

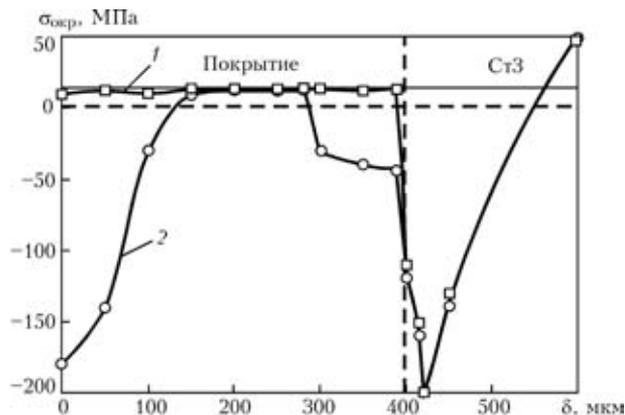


Рис. 13. Распределение напряжений по толщине покрытия из ПП ФМИ-2 без дробеструйной обработки (1) и после нее (2)

к существенному повышению когезии покрытия — прочность последнего на разрыв возрастает со 100 до 135 МПа.

На примере формирования электродуговых покрытий из ПП ФМИ-2 можно сделать вывод, что изучение закономерностей возникновения и перераспределения внутренних напряжений в покрытиях во время их нанесения является важным для понимания природы процессов, которые определяют последующую работоспособность напыленных покрытий. В частности, при охлаждении покрытий сжатым воздухом в них возникают растягивающие напряжения, большие, чем при охлаждении на спокойном воздухе. Повышение давления сжатого воздуха также способствует возрастанию максимальных окружных напряжений растяжения. Значительно уменьшить уровень растягивающих напряжений и повысить прочностные характеристики покрытий можно путем подогрева металлической подложки непосредственно перед напылением и дробеструйной обработки поверхности покрытия после напыления.

1. Скворцов Б. П., Сидоренко Ю. А. Расчет остаточных напряжений в газотермическом напыленном слое // Сб. науч. тр. Белорус. сельскохоз. акад. — Минск, 1984. — С. 28–35.
2. Студент М. М., Піх В. С. Залежність рівня залишкових напружень від складу покриття і режимів електродугової металізації // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 1993. — № 5. — С. 46–52.
3. Похмурський В. І., Студент М. М. Виникнення та перерозподіл внутрішніх напружень в покриттях в процесі їх нанесення // Мат. методи та фізико-механічні поля. — 1998. — № 2. — С. 105–108.

Electric-arc flux-cored wire deposition of coatings results in formation of residual tensile stresses, which may cause initiation of cracks in the coatings or their fracture, especially in finishing operations. It is shown that the coating deposition parameters have a substantial effect both on the kinetics of formation of internal stresses and on their residual level.

Поступила в редакцию 07.06.2005,
в окончательном варианте 21.02.2006