

УДК 631.3.004.67:621.793.724

## ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

*д-р техн. наук, проф. В.С. ИВАШКО, канд. техн. наук К.В. БУЙКУС  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассматривается оптимизация моделированием основных технологических параметров активированной дуговой металлизации при восстановлении коленчатых валов. Представлена модель для прогнозирования скорости разгона напыляемых частиц и их параметры. Разработанная модель движения и нагрева частицы при активированной дуговой металлизации позволяет анализировать параметры двухфазного потока, в частности состояние частиц дисперсной фазы, по дистанции напыления при различных режимах работы металлизатора и выбирать оптимальные параметры процесса активированной дуговой металлизации при модернизации оборудования и разработке новых технологических процессов восстановления коленчатых валов. В модели учтены аэродинамические и теплофизические параметры газового потока и летящей в нем частицы.*

Одним из эффективных методов восстановления таких тяжело нагруженных деталей, как коленчатые валы, является активированная дуговая металлизация, которая вносит минимальный уровень термических напряжений в деталь. Для оптимизации технологического процесса нанесения покрытий применяется метод моделирования, при котором возможно получение достаточного объема информации об изучаемом процессе при минимуме временных и финансовых затратах, что сегодня весьма актуально.

**Основная часть.** Среди многих факторов, влияющих на качество покрытия при активированной дуговой металлизации (АДМ), одними из главных являются скорость и тепловое состояние частиц напыляемого материала в момент столкновения с подложкой. Что обусловило разработку модели, которая позволила прогнозировать температуру и скорости движения частицы и газа.

При построении модели использовались следующие допущения:

- в рамках теории Прандтля, турбулентный поток при своем движении увлекает жидкие частицы, на которые действует только сила аэродинамического сопротивления газа;
- истечение газа из сопла происходит в соответствии с теорией турбулентной струи для осесимметричного источника и неподвижной окружающей среды;
- движение и теплообмен газа и частицы осуществляется в соответствии с теорией двухфазных потоков; частицы имеют сферическую форму;
- расчет ведется только по длине оси струи, так как скорость частицы в направлении, перпендикулярном оси струи, значительно меньше, чем в осевом;
- в пределах малого отрезка пути основные теплофизические параметры частицы и окружающей ее среды (струи) не изменяются и остаются постоянными; в пределах малого участка частица движется равноускоренно.

**Температура сгорания пропано-воздушной смеси и начальная скорость струи.** Расчетная температура горения пропано-воздушной смеси  $T_p$  может быть определена по формуле:

$$T_p = \frac{Q_p^H - \Delta Q_0^{CO_2} + \Delta Q_0^{H_2O}}{V_{nc} \cdot c + V_6^{ocm} \cdot c'_{возд}}, \quad (1)$$

где  $\Delta Q_0^{CO_2}$  – теплота диссоциации  $CO_2$ ;  $\Delta Q_0^{H_2O}$  – теплота диссоциации  $H_2O$ ;  $c$  – объемная средневзвешенная теплоемкость продуктов горения;  $Q_p^H$  – низшая теплотворная способность пропана;  $V_{nc}$  – общий объем продуктов горения пропано-воздушной смеси;  $V_6^{ocm}$  – общий объем остаточного воздуха;  $c'_{возд}$  – теплоемкость воздуха.

График, отражающий влияние коэффициента избытка воздуха в горючей смеси  $\alpha$  на температуру продуктов горения, представлен на рисунке 1. Максимальная величина температуры продуктов сгорания имеет место при  $\alpha < 1$  (при недостатке окислителя). Это объясняется тем, что продукты сгорания углево-

дородов при  $\alpha < 1$  содержат большее количество СО, который хотя и является продуктом неполного сгорания, но в то же время сравнительно устойчив против дальнейшей диссоциации. Вследствие этого при  $\alpha < 1$  затраты тепла на диссоциации снижаются, что и приводит к повышению температуры пламени. Причем избыток пропана создает восстановительную защитную атмосферу в распыляющем потоке. Однако при неполном сгорании топлива, как известно, интенсивно образуется угарный газ СО, который неизбежно попадает в помещение для напыления. К тому же при избытке пропана, который также попадает в помещения для напыления, образуя взрывоопасную смесь, падает экономическая эффективность АДМ.

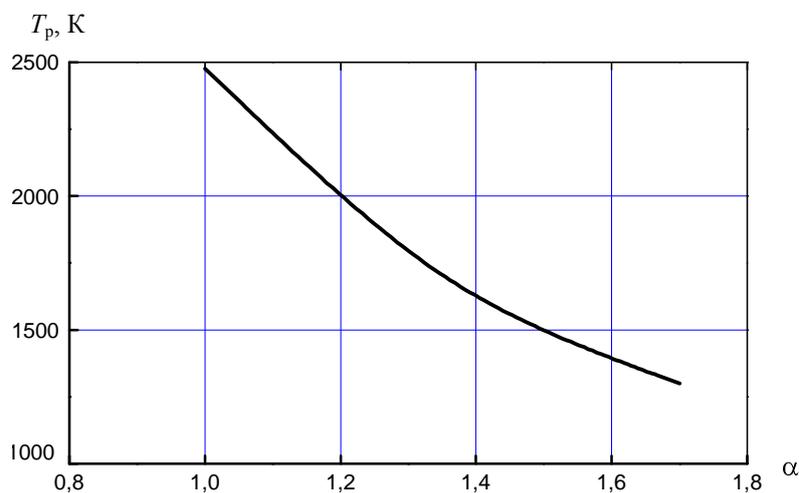


Рис. 1. Влияние коэффициента избытка воздуха в горючей смеси на температуру продуктов горения

С учетом вышесказанного все тепловые расчеты проводятся при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha \geq 1$ .

Струя вылетающих из сопла продуктов горения является свободной и затопленной, так как она не ограничена твердыми стенками и распространяется в пространстве, заполненном средой тех же физических свойств, что и вещество струи. Поэтому струя имеет два участка – начальный и основной. Причем на начальном участке параметры струи остаются неизменными и равными параметрам струи на срезе сопла.

Расположение полюса струи

$$h_0 = R_c \cdot \frac{0,29}{a},$$

где  $R_c$  – радиус отверстия сопла, мм;  $a$  – коэффициент турбулизации потока.

Влияние диаметра проволок на коэффициент турбулизации потока видно из уравнения:

$$a = \left( 0,4 \cdot \frac{d_{np}}{2R_c} \right)^{2,56} + a_1, \quad (2)$$

где  $d_{np}$  – диаметр электродной проволоки;  $a_1$  – коэффициент турбулентности для данного сопла в случае отсутствия электродных проволок (например, для сопла диаметром 6 мм  $a_1 = 0,056$ , для сопла диаметром 3 мм  $a_1 = 0,057$ ).

С аэродинамической точки зрения целесообразно применять более тонкие проволоки, так как при этом осевая скорость потока убывает по мере удаления от сопла менее интенсивно и, следовательно, не требуется очень строго выдерживать установленное расстояние между соплом аппарата и поверхностью детали.

Длина начального участка струи

$$s_0 = R_c \cdot \frac{0,67}{a}.$$

Длина участка от полюса до некоторого сечения струи

$$x = L + h_0,$$

где  $L$  – расстояние от сопла до некоторого сечения струи.

Начальная скорость струи определяется из уравнения состояния:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2gkR}{k-1} T_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_n}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $k$  – показатель адиабаты струи;  $R$  – газовая постоянная;  $p_n$  – давление горючей смеси пропана и воздуха, поступающей в камеру сгорания;  $p_0$  – давление потока продуктов горения на срезе сопла  $p_0 = p_n \frac{T_p}{T_n}$ .

$$k = \frac{V_{ocm}}{V_{nc}} \cdot k_g + \frac{V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}}{V_{nc}} \cdot k_{nc}. \quad (4)$$

Здесь  $k_g$  – показатель адиабаты воздуха без примесей ( $k_g = 1,4$ );  $k_{nc}$  – показатель адиабаты продуктов горения без примеси воздуха ( $k_{nc} = 1,2$ ).

$$p_n = p_g \cdot \frac{23,8 \cdot \alpha}{23,8 \cdot \alpha + 1} + p_n \cdot \frac{1}{23,8 \cdot \alpha + 1}. \quad (5)$$

Здесь  $p_g$  – давление сжатого воздуха на входе в металлизатор, МПа;  $p_n$  – давление пропана на входе в металлизатор, МПа.

На рисунке 2 показано, как коэффициент избытка воздуха влияет на начальную скорость струи продуктов горения.

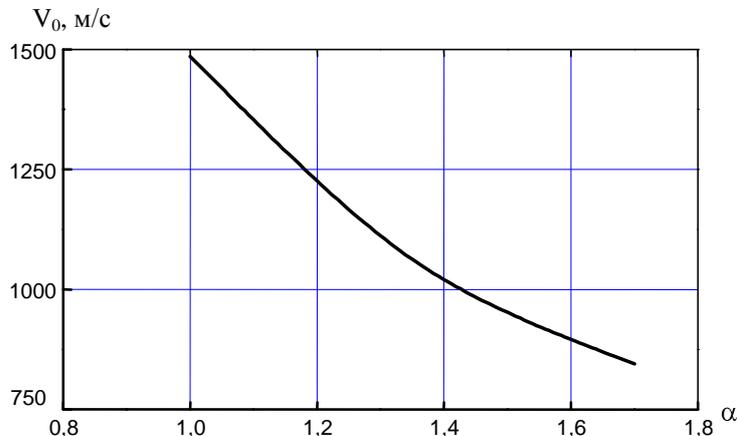


Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) на начальную скорость струи продуктов горения ( $V_0$ )

**Температура струи в зависимости от дистанции напыления.** Закон падения температур вдоль оси турбулентной струи круглого сечения был выведен на основании постоянства теплосодержания струи:

$$\frac{a \cdot x}{R_c} = \frac{\Delta T_0}{\Delta T_c} \sqrt{0,36 \cdot \left( 1 - \frac{T_n}{T_0} \right) \cdot \frac{\Delta T_c}{\Delta T_0} + 0,495 \cdot \frac{T_n}{T_0}}, \quad (6)$$

где  $\Delta T_0 = T_0 - T_n$  – разность между температурами в начальном сечении струи и в окружающем пространстве;  $\Delta T_c = T_c - T_n$  – разность между температурами на оси струи и в окружающем пространстве.

Решением квадратного уравнения (6) относительно  $T_c$  является выражение:

$$T_c \cdot x = \frac{0,18 \cdot T_0 - T_n^2 + \sqrt{0,18^2 \cdot T_0 - T_n^4 + 0,495 \cdot T_0 \cdot \left(\frac{a \cdot x}{R_c}\right)^2 \cdot T_n \cdot T_0 - T_n^2}}{T_0 \cdot \left(\frac{a \cdot x}{R_c}\right)^2} + T_n. \quad (7)$$

**Скорость струи в зависимости от дистанции напыления.** Зависимость скорости струи от дистанции напыления определяется из закона падения скорости вдоль оси турбулентной газовой струи круглого сечения:

$$\frac{a \cdot x}{R_c} = \frac{V_0}{V} \sqrt{0,495 \cdot \left(1 - \frac{T_n}{T_0}\right) \cdot \frac{V}{V_0} + 0,93 \cdot \frac{T_n}{T_0}}. \quad (8)$$

После преобразования получаем квадратное уравнение:

$$V^2 \frac{a^2 \cdot x^2}{R_c^2} - V \cdot 0,495 \cdot V_0 \cdot \left(1 - \frac{T_n}{T_0}\right) - 0,93 \frac{T_n}{T_0} V_0^2 = 0. \quad (9)$$

Корень квадратного уравнения с положительным значением определяется по формуле:

$$V = \frac{0,495 \cdot V_0 \cdot \left(1 - \frac{T_n}{T_0}\right) + \sqrt{\left(0,495 \cdot V_0 \cdot \left(1 - \frac{T_n}{T_0}\right)\right)^2 + 3,72 \cdot \frac{a^2 \cdot x^2 \cdot T_n \cdot V_0^2}{R_c^2 \cdot T_0}}}{2 \cdot \left(\frac{a \cdot x}{R_c}\right)^2}. \quad (10)$$

Скорость двухфазной газовой струи вычисляется с учетом поправочного коэффициента  $\varepsilon$  концентрации примеси (металлических частиц):

$$V_c = V \cdot \varepsilon, \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{0,567 \cdot R_c}{a \cdot x} \chi_0}}, \quad (12)$$

где  $\chi_0$  – концентрация примеси (частиц металла в распыляющем газе).

**Скорость частицы в зависимости от дистанции напыления.** Взаимодействие между частицей и газом проявляется в виде аэродинамической силы лобового сопротивления, действующей на частицу в направлении относительной скорости обтекания. Величина и направление силы лобового сопротивления определяется относительной скоростью обтекания частицы сплошной средой. Действием остальных сил можно пренебречь.

В пределах участка  $\Delta L$  можно допустить, что частица движется равноускоренно под действием аэродинамической силы струи продуктов горения и тормозится аэродинамической силой лобового сопротивления неподвижной среды помещения.

Уравнение баланса сил, действующих на частицу, в проекции на направление движения частицы следующее:

$$\vec{F}_w + \vec{F}_c + \vec{F}_j = \vec{F}, \quad (13)$$

где  $\vec{F}_w$  – сила сопротивления полету частицы в стоячем воздухе помещения;  $\vec{F}_c$  – аэродинамическая сила струи продуктов горения;  $\vec{F}_j$  – сила инерции частицы.

$$F_w = -s \cdot V_{cpx}^2 \cdot C_x \cdot \gamma. \quad (14)$$

Здесь  $s$  – площадь поперечного сечения частицы;  $V_{cpx}$  – средняя скорость частицы в пределах малого участка;  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления частицы, зависящий от числа Рейнольдса при  $Re > 500$ ,  $C_x = 0,44$ .

$$F_C = s \cdot (V_{cpc} - V_{cpx})^2 \cdot C_x \cdot \gamma, \quad (15)$$

где  $V_{cpc}$  – средняя скорость струи в пределах малого участка пути.

$$F_j = -m \frac{\Delta V_x}{\Delta t}. \quad (16)$$

Здесь  $\Delta t$  – время полета частицы в пределах малого участка;  $\Delta V_x$  – изменение скорости частицы за время  $\Delta t$ .

Подставляя полученные формулы в (13), получим квадратное уравнение, корнем которого и будет скорость частицы в конце малого участка пути:

$$V_{кx} = \frac{V_{cpc} - \sqrt{V_{cpc}^2 + 4 \cdot \frac{m}{C_x \cdot s \cdot \gamma \cdot \Delta L} \cdot \left( V_{cpc}^2 - V_{cpc} \cdot V_{нх} + \frac{m \cdot V_{нх}^2}{C_x \cdot s \cdot \Delta L} \right)}}{-\frac{2 \cdot m}{C_x \cdot s \cdot \gamma \cdot \Delta L}}. \quad (17)$$

Зависимость скорости струи и частиц на оси от дистанции напыления при различном коэффициенте избытка воздуха в горючей смеси показана на рисунке 3.

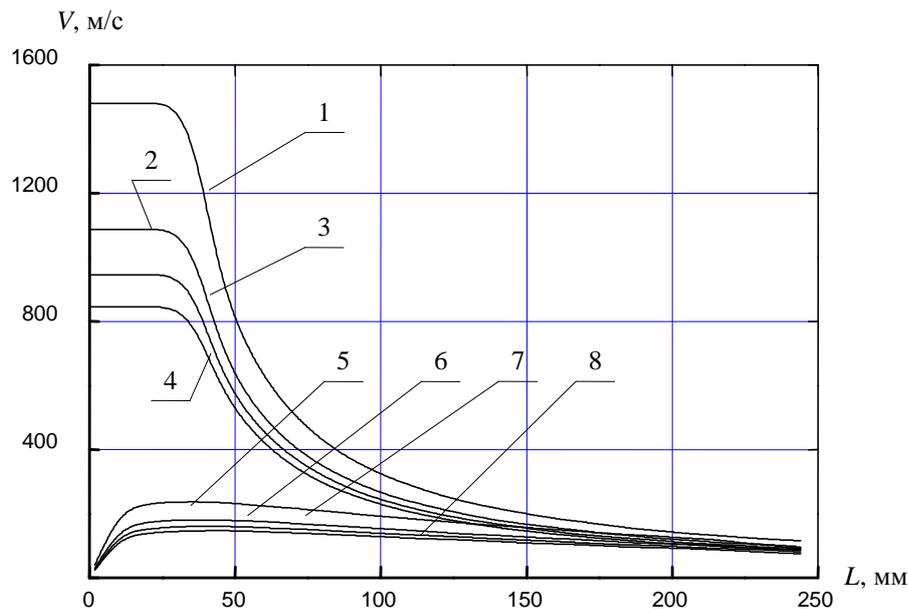


Рис. 3. Зависимость скорости струи (1, 2, 3, 4) и частиц (5, 6, 7, 8) при коэффициентах избытка воздуха:  $\alpha = 1,0$  (1, 5);  $\alpha = 1,3$  (2, 6);  $\alpha = 1,5$  (3, 7);  $\alpha = 1,7$  (4, 8), от дистанции напыления

Видно, что чем больше скорость струи, тем больше скорость частицы, и у частиц после окончания начального участка газовой струи скорость изменяется с меньшей интенсивностью, что связано с относительно большой массой частиц.

**Температура струи на поверхности частицы.** Температура струи на поверхности частицы, летящей в неподвижной среде, определяется по формуле:

$$T_{cpcb} = T_{cpc} \cdot \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right), \quad (18)$$

где  $M$  – число Маха.

Так как частица движется, во-первых, относительно неподвижной среды помещения и, во-вторых, относительно струи, то в (18) необходимо ввести слагаемое, учитывающее движение частицы относительно струи:

$$T_{срcb} = T_{срc} \cdot \left( 1 + \frac{k-1}{2} \left( \frac{V_{срx}}{a_o} \right)^2 + \frac{k-1}{2} \left( \frac{V_{срc} - V_{срx}}{a_{nc}} \right)^2 \right), \quad (19)$$

где  $a_{nc}$  – скорость звука в струе.

$$a_{nc} = \sqrt{k_{nc} \cdot g \cdot R \cdot T_{срc}}.$$

В формуле (19) второе слагаемое выражает сопротивление воздуха помещения полету частицы, а третье слагаемое – сопротивление частицы струе продуктов горения пропано-воздушной смеси.

**Температура частицы с учетом ее теплообмена с распыляющей струей.** Начальная температура частицы в момент ее отрыва от электрода равна температуре плавления  $T_{нх} = T_{пл}$ .

Для оценки температуры частицы по глубине расчет производился по формуле:

$$T_{кx} = T_{нх} - T_{срc} \frac{R_x}{R \cdot \sqrt{3 \cdot Bi}} \sin \left( \sqrt{3 \cdot Bi} \frac{R}{R_x} \right) \cdot \exp \left( -3 \cdot Bi \frac{3600 \cdot a_{mo} \cdot \Delta L}{V_{срx} \cdot R_x^2} \right) + T_{срc}, \quad (20)$$

где  $Bi$  – число Био.

Плотность теплового потока:

$$W = 0,172 \cdot a \cdot c \cdot \gamma_c \cdot V_{срc} \cdot T_{срc} + T_{срcb} - T_{нх}, \quad (21)$$

где  $\gamma_c$  – средневзвешенная плотность продуктов горения.

Изменение температуры частицы за время полета в пределах малого участка пути:

$$\Delta T = W \cdot s \cdot \frac{\Delta L}{V_{срx} \cdot c_{рx} \cdot m}, \quad (22)$$

где  $s$  – площадь частицы;  $c_{рx}$  – теплоемкость материала частицы, для стали  $c_{рx} = 0,1590$  ккал/(кг·град).

Температура частицы в конце малого участка всего пути полета ( $\Delta L$ ) составит  $T_x = T_{нх} + \Delta T$ .

Зависимость температуры частиц и струи от дистанции напыления при различных коэффициентах избытка воздуха в горючей смеси показана на рисунке 4.

$T, K$

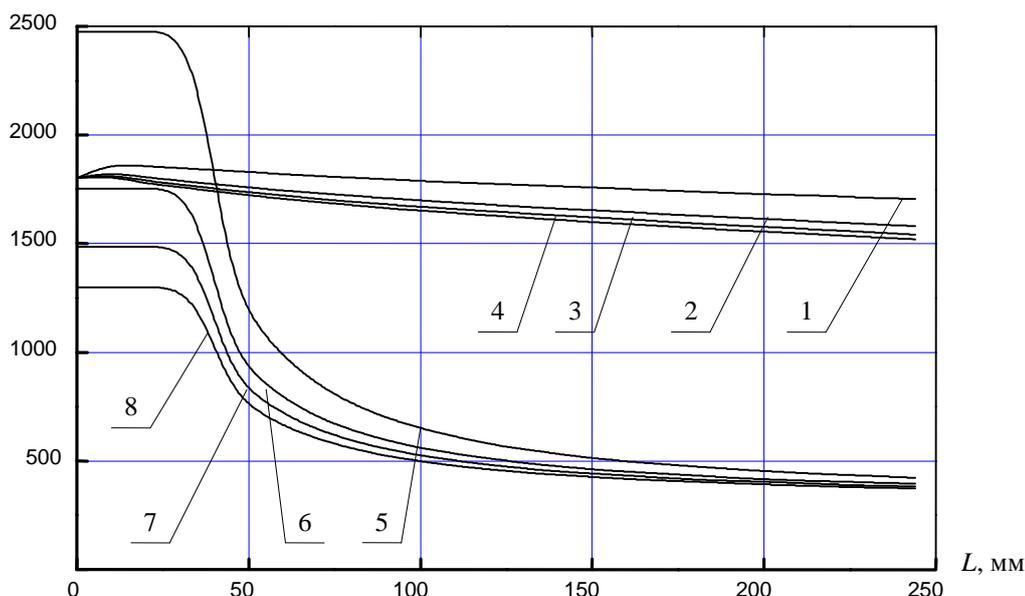


Рис. 4. Зависимость температуры частиц (1, 2, 3, 4) и струи (5, 6, 7, 8) при коэффициентах избытка воздуха:  $\alpha = 1$  (1, 5);  $\alpha = 1,3$  (2, 6);  $\alpha = 1,5$  (3, 7);  $\alpha = 1,7$  (4, 8), от дистанции напыления

Как видно из рисунка 4, температура частиц при  $\alpha = 1,0$  (кривая 1) на начальном участке струи несколько повышается и далее падает менее интенсивно, чем при других коэффициентах избытка воздуха, больших 1,0; у частиц после окончания начального участка газовой струи температура изменяется с малой интенсивностью, что связано с энтальпией плавления металла.

Таким образом, оптимальным режимом напыления активированной дуговой металлizations является обеспечение коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,0 \dots 1,1$  и дистанции напыления 190...210 мм.

**Заключение.** Разработанная модель движения и нагрева частицы при АДМ позволяет:

- анализировать параметры двухфазного потока, в частности состояние частиц дисперсной фазы, по дистанции напыления при различных режимах работы металлизатора;
- выбирать оптимальные параметры процесса АДМ при модернизации оборудования и разработке новых технологических процессов восстановления коленчатых валов.

В модели учтены аэродинамические и теплофизические параметры газового потока и летящей в нем частицы. Установлено, что при АДМ частицы распыляемого материала на расстоянии до 200 мм от среза сопла металлизатора находятся в расплавленном состоянии, обеспечивая образование плотного покрытия с высокой когезией. Определены параметры оптимального режима напыления: коэффициент избытка воздуха 1,0...1,1; дистанция напыления 190...210 мм.

Поступила 12.01.2011

#### OPTIMIZATION BY THE MODELLING OF THE MAIN TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ACTIVATED ARCHED METALLIZATION UNDER RECONSTRUCTION OF CRANKSHAFTS

V. IVASHKO, K. BUYKUS

*Optimization by the modelling of the main technological parameters of activated arched metallization under reconstruction of crankshafts is considered. The model for projection runaway speed sputtering particles and their parameters is presented. The model of motion and heating of particles under activated arched metallization enables to analyse the parameters of two-phase stream, in particular condition dispersed particles, on spraying distance under different operating mode of the metal spray gun and choose optimal parameter process*

*of the activated arched metallization under retrofit installation and working out new production method of the crankshaft reconstruction. In the model aerodynamical and thermophysical parameters of the gas stream and of the flying therein particle are taken into account.*