

ПОВЕДЕНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО ТЕПЛООВОГО НАГРУЖЕНИЯ

Е.А. Будовских, Н.Н. Назарова, В.П. Симаков, П.С. Носарев

*Сибирский государственный индустриальный университет,
654007, г. Новокузнецк Кемеровской обл., Россия, ул. Кирова, 42
e-mail: step@sibgiu.kemerovo.su*

Изучена возможность использования импульсных плазменных пучков, формируемых при электрическом взрыве проводников, для упрочнения теплозащитных керамических покрытий. Плазменное облучение поверхности приводит к образованию сетки трещин на глубину 0,1 ... 0,2 толщины покрытия. Такие трещины позволяют демпфировать термические напряжения, возникающие в процессе эксплуатации покрытий. Определены параметры плазменного воздействия и возможности управления режимом обработки.

Для защиты поверхности лопаток газотурбинных двигателей используют теплозащитные покрытия (ТЗП) на основе стабилизированного оксида циркония. В процессе эксплуатации под действием теплосмен покрытия разрушаются. Растрескивание начинается с поверхности, испытывающей действие максимальных термических напряжений. При этом трещины проникают на всю глубину покрытий (порядка нескольких десятков микрометров) вплоть до металлического подслоя, что усиливает окисление лопаток. Замедлить процесс разрушения можно путем предварительного наведения на поверхности сетки неглубоких трещин, играющих в процессе эксплуатации лопаток роль демпфера. Наведение трещин в покрытиях возможно с использованием импульсных концентрированных потоков энергии, в частности, плазменных [1, 2].

Одним из таких инструментов воздействия на поверхность являются плазменные пучки, формируемые при электрическом взрыве проводников. Целью данной работы и явилось изучение возможности их использования для упрочнения покрытий. Для этого изучали поведение ТЗП из стабилизированного оксида циркония при импульсном воздействии плазмы на поверхность в различных режимах.

Возможности управления интенсивностью воздействия электровзрывных плазменных пучков определяются прежде всего изменением зарядного напряжения U емкостного накопителя энергии установки и расстояния h облучаемой поверхности от среза сопла. Пороговое значение поглощаемой плотности мощности $q = q_0$, приводящее к оплавлению поверхности, может быть рассчитано [3] по соотношению

$$q_0 = T_{пл} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4\chi\tau_u}}$$

где $T_{пл}$ – температура плавления покрытия; λ и $\chi = \lambda/(c\rho)$ – его тепло- и температуропроводность соответственно; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; τ_u – время импульса воздействия.

Расчеты с использованием справочных данных из работы [4] $\lambda = 2$ Вт/(м·К), $c = 502$ Дж/(кг·К), $\rho = 6 \cdot 10^3$ кг/м³, $T_{пл} = 2973$ К показывают, что $q_0 = 6,4 \cdot 10^8$ Вт/м² (время воздействия $\tau_u = 100$ мкс плазменного пучка на поверхность принимали равным времени разряда накопителя энергии).

Изменяя величину зарядного напряжения U , опытным путем можно определить значение U_0 , соответствующее пороговому значению интенсивности воздействия q_0 . С учетом того, что $q \sim U^2$, интенсивность обработки при произвольном значении q может быть представлена как $q = q_0 \cdot (U/U_0)^2$.

Экспериментально было установлено, что при диаметре d_a канала сопла и расстоянии h , равных 20 мм, $U_0 = 0,75$ кВ. Это соответствовало энергии W , запасаемой накопителем, равной 1,4 кДж (емкость накопителя $C = 5$ мФ).

Увеличение h приводит к уменьшению интенсивности воздействия, что обусловлено расширением пучка в форвакуумной технологической камере установки. Экспериментальная зависимость $q = f(h)$, показанная на рис. 1, была получена путем калориметрических измерений при обработке термоизолированного образца меди. При этом значения q рассчитывали по формулам

$$q = \frac{Q}{S\tau_u}, \quad Q = mc\Delta T,$$

где Q – количество теплоты, поглощаемой образцом при обработке; S – облучаемая площадь поверхности; m – масса образца; ΔT – повышение его температуры.

Для измерения ΔT использовали термопару, зачеканенную в образец с обратной стороны. Сигнал с термопары выводили на графопостроитель, градуировку которого проводили с использованием известных значений теплофизических параметров меди λ и χ .

Полученная зависимость $q = f(h)$ спрямлялась в координатах $q - r_f^{-2}$ (рис. 1).

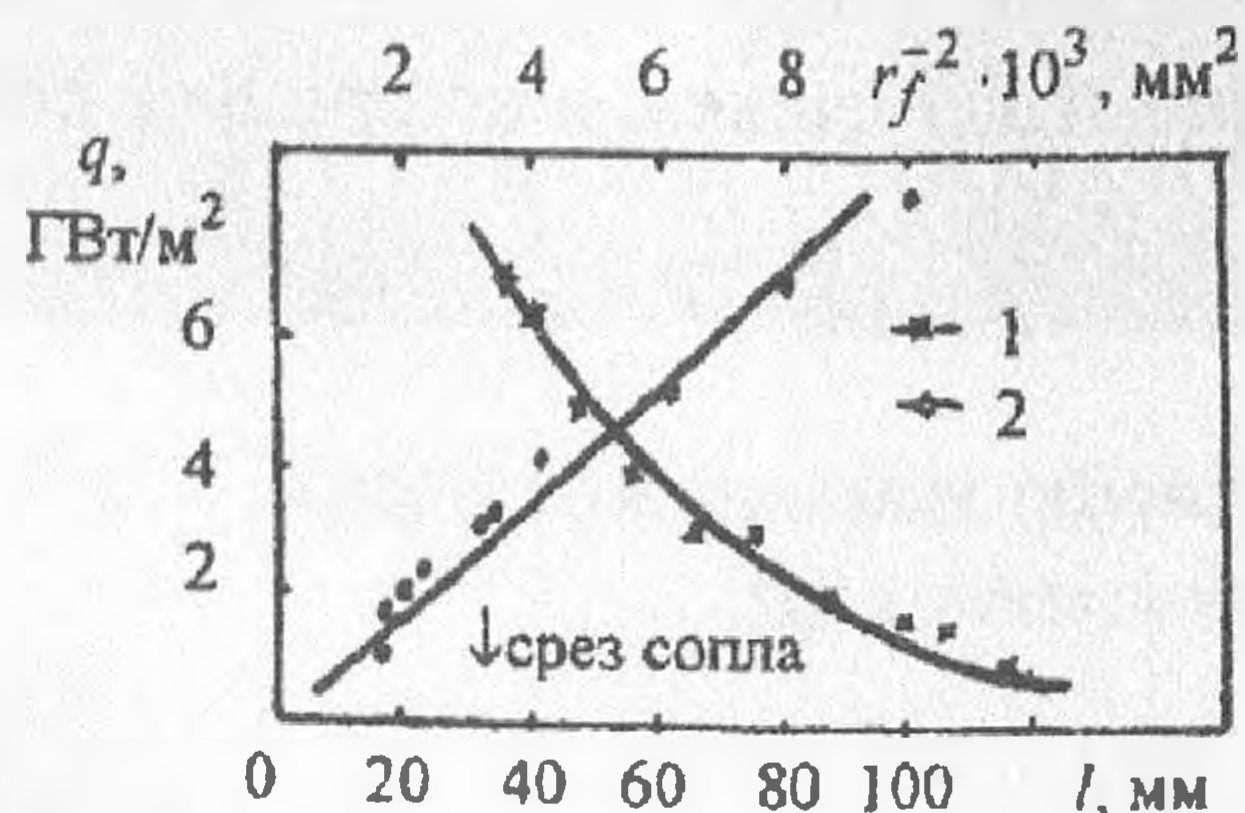


Рис. 1. Зависимость поглощаемой плотности мощности q от расстояния l образца меди от области взрыва проводника (1) и от величины r_f^{-2} (2) при $U = 2,0$ кВ.

Это свидетельствовало о нормальном распределении теплового потока через облучаемую поверхность, поскольку в этом случае

$$q = \eta_T \cdot \frac{W}{\pi r_f^2 \tau_u},$$

где η_T – термический КПД обработки; r_f – радиус зоны плазменного воздействия.

Значения r_f рассчитывали по радиусу струи, исходя из соотношения

$$r_f = r_a + h \operatorname{tg} \theta - \delta,$$

где r_a – радиус канала сопла; θ – начальный угол наклона вектора скорости истечения плазмы на кромке сопла; δ – параметр, показанный на рис. 2.

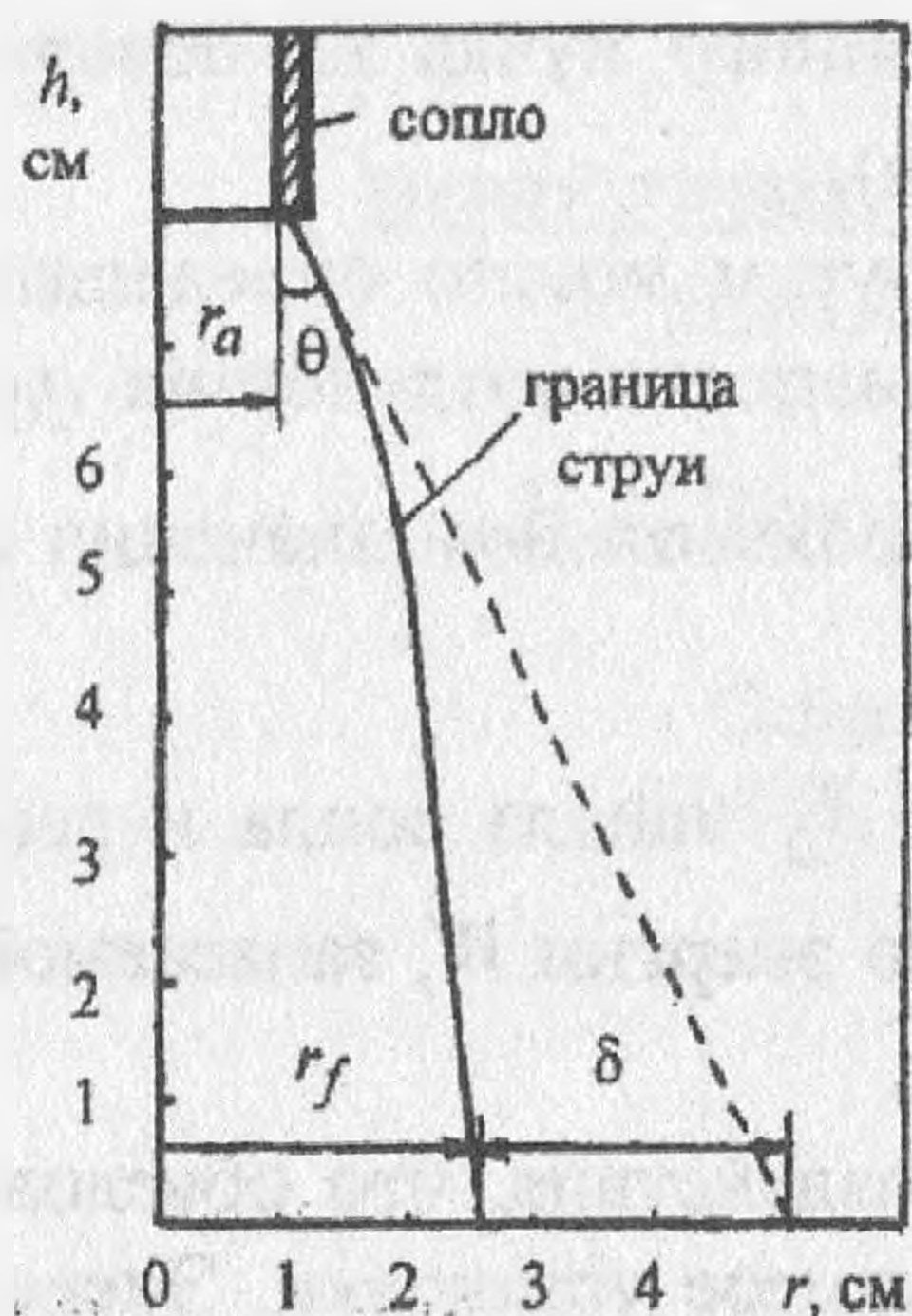


Рис. 2. Профиль плазменной струи при распространении в технологической камере с давлением 100 Па (штриховой линией показан профиль распространения струи в вакууме)

Угол θ находили, используя газодинамические функции [5, 6]

$$\theta = \omega(M_n) - \omega(M_a),$$

$$\omega(M) = \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M^2 - 1)} - \operatorname{arctg} \sqrt{M^2 - 1},$$

где γ – показатель адиабаты плазменной струи; M_n и M_a – числа Маха на границе струи и на срезе сопла соответственно.

Проведенные расчеты угла θ при давлении в технологической камере, равном 100 Па, хорошо согласовались с экспериментальными данными фоторегистрации пучка.

Плазменная обработка поверхности вызывает импульсное изменение ее температуры ΔT и появление напряжений сжатия [7]

$$\sigma = \frac{\alpha E \Delta T}{1 - \mu},$$

где α – температурный коэффициент расширения; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона.

При $\Delta T = 2700$ К, соответствующем нагреву поверхности до температуры плавления, с использованием данных работы [4] $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$; $E = 200$ ГПа, $\mu = 0,22$, расчеты показывают, что $\sigma \cong 3,6$ ГПа. Это превышает предел прочности стабилизированного диоксида циркония при сжатии $\sigma_s = 1,7 \dots 2,0$ ГПа [4]. Заметим, что величина динамического давления пучка на поверхность при указанных выше значениях U_0 , h и d_a не превышала 2 МПа (рис. 3), поэтому влияние этого давления на процесс разрушения было незначительно.

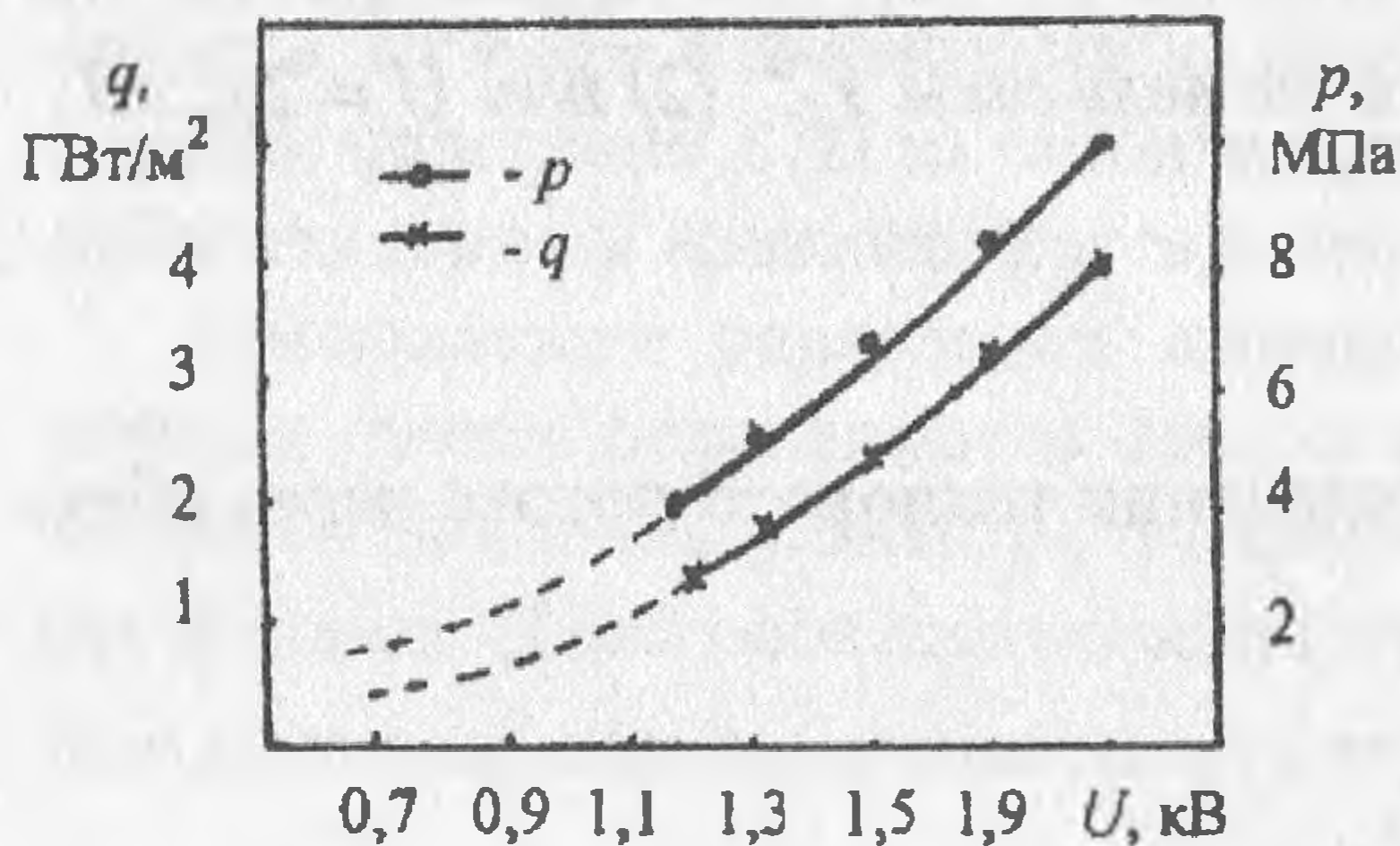


Рис. 3. Зависимость поглощаемой плотности мощности и динамического давления плазменного пучка на облучаемую поверхность при d_a и h , равных 20 мм.

Проведенные исследования подтвердили это. При $h = 20$ мм, $U = U_0$ на поверхности образовывалась сетка трещин (рис.4, а) с характерным размером $l = 50 \dots 60$ мкм, определяемым, как известно [8], механическими характеристиками материала. Однако глубина распространения трещин (рис. 4, б) достигала только 10 мкм. Это было связано с тем, что упругая энергия, выделяющаяся при образовании трещин, была локализована только в тонком приповерхностном слое, глубина которого определялась глубиной проникновения тепла в процессе нагрева. Ее значение z может быть оценено как

$$z = \sqrt{\frac{4\chi\tau_{\text{и}}}{\pi}} \cdot \frac{T_{\text{пл}} - T}{T_{\text{пл}}},$$

где T – начальная температура покрытия.

Расчеты показывают, что $z \cong 8$ мкм, что хорошо согласуется с данными измерений.

Уменьшение h при данном значении U_0 , а также увеличение U при данном h приводило к оплавлению тонкого поверхностного слоя. Образующийся расплав испытывал течение от центра к периферии зоны обработки под действием неоднородного давления пучка. При этом трещины по-прежнему образовывались. В общем случае увеличение h при заданном U приводило к увеличению площади зоны плазменного воздействия, которая при $h = 8$ см достигала 20 см^2 . Дальнейшее увеличение h не приводило к заметным изменениям ни характера разрушения покрытия, ни размеров зоны обработки (рис. 2).

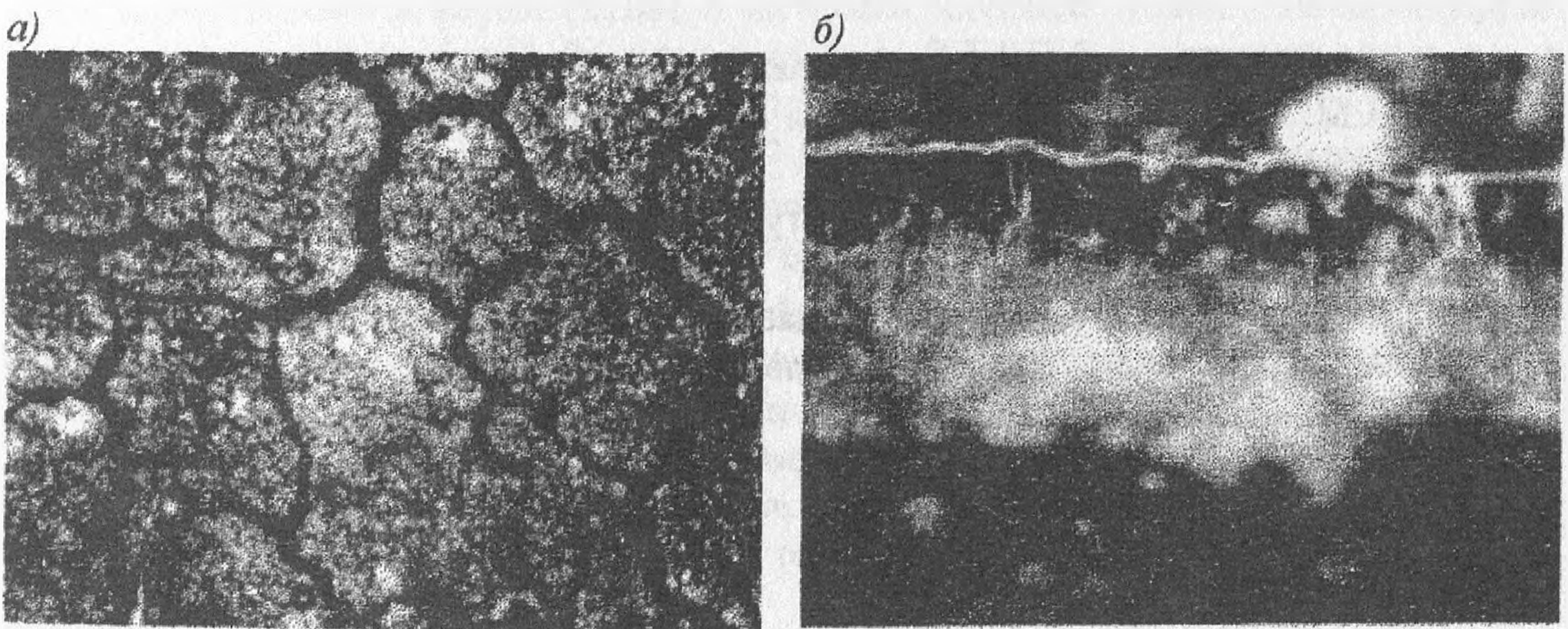


Рис.4. Микрофотографии облученной поверхности ТЗП с наведенными трещинами (а) и поперечного сечения покрытия (б).

Были проведены сравнительные испытания на термостойкость исходных покрытий и покрытий с наведенными трещинами. С этой целью образцы нагревали до 1320 К, давали выдержку 15 мин и охлаждали в воду. Как показали металлографические исследования, при термоциклировании исходных образцов отслоение керамики происходило при числе циклов ~ 50 . При термоциклировании облученных образцов отслоение начинало происходить лишь после 120 циклов.

Данные по разрушению ТЗП, полученные нами, согласуются с результатами работы [1], в которой было также показано, что плазменная обработка покрытий с опла-

лением поверхности приводит к структурной трансформации оксидного слоя ZrO_2 - Y_2O_3 . Это существенно снижает его газопроницаемость и скорость роста окалины Al_2O_3 на границе металл-керамика.

Таким образом, изменяя такие параметры, как интенсивность плазменного воздействия и площадь зоны облучения, импульсную электровзрывную обработку можно эффективно использовать для упрочнения ТЗП путем предварительного наведения сетки трещин на глубину 0,1 ... 0,2 от толщины покрытия. Это позволяет снимать концентрацию напряжений в поверхностном слое в процессе эксплуатации и замедлять разрушение покрытий.

Список литературы.

1. Волошин М.Н., Гасин Д.А., Ищенко Е.С. Повышение долговечности турбинных лопаток методом импульсно-плазменной обработки // Физ. и химия обраб. матер. 1995. № 3. С. 62 - 66.
2. Шамарина Г.Г., Барвинок В.А., Курбатов В.П. Упрочнение теплозащитных покрытий // Пробл. машиностр. и автоматиз. 1995. № 1-2. С. 55 - 57.
3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
4. Калинович Д.Ф., Кузнецова Л.И., Денисенко Э.Т. Диоксид циркония: свойства и применение. (Обзор зарубежной печати) // Порош. металлургия. 1987. № 11. С. 98 - 103.
5. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
6. Сизов А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. М.: Металлургия, 1987. 256 с.
7. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. М.: Физматгиз, 1963. 346 с.
8. Владимиров В.И. Физическая теория пластичности и прочности. Часть 2. Точечные дефекты. Упрочнение и возврат: Конспект лекций / Ленингр. политехн. ин-т им. М.И. Калинина. Л., 1973. 152 с.