

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО РЭП МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

В.Ф. Клепиков, Ю.Ф. Лонин, В.В. Литвиненко*, А.В. Пащенко, А.Г. Пономарёв, В.В. Уваров, В.Т. Уваров, В.И. Шеремет*

Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Харьков, Украина

**Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины*

Разработан метод дистанционного нанесения упрочняющих покрытий с помощью сильноточного релятивистского электронного пучка микросекундной длительности. Эксперименты проводились на импульсном электронном ускорителе ТЕМП-А в режиме разовых посылок. Параметры РЭП: ток 1...5 кА, энергия электронов до 0,5 МэВ, длительность импульса 2...5 мкс, плотность мощности до $5 \cdot 10^{12}$ Вт/м². Метод заключается в нанесении слоя расплавленного электронным пучком материала на холодную подложку. При этом плавление наносимого материала происходит на некотором расстоянии от подложки, что обеспечивает ускорение расплавленного слоя электронным пучком в направлении подложки и ее оплавление. Материал покрытия смешивается с материалом подложки и вступает с ним в химическую реакцию в специфических условиях высокого давления и температуры, что обеспечивает формирование покрытий с заданными наперед свойствами.

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных технологиях обработки поверхностей материалов значительное место занимают энергоносители высокой мощности, такие как электронные, ионные, рентгеновские потоки. Использование импульсных потоков ионизирующего излучения для решения технологических задач, несмотря на достигнутые результаты, находится на раннем этапе развития. Интерес исследователей в этой области был сосредоточен, в основном, на использовании импульсных потоков ионизирующего излучения для поверхностной закалки и переплава сплавов, что открывало возможности получения материалов с повышенной прочностью и износостойкостью. Это обусловлено тем, что в процессе эксплуатации, как правило, высоким механическим и термическим нагрузкам подвергаются, в первую очередь, поверхности оборудования и деталей. Представлялось актуальным рассмотреть возможности использования импульсных сильноточных пучков электронов (ИСПЭ) для нанесения покрытий. Данная проблема рассматривалась в работе [1], где были предложены численные модели, описывающие гидродинамические процессы в материале, в процессе его испарения ИСПЭ и движения к обрабатываемой поверхности. Вместе с тем, принимая во внимание перспективы технологического использования получаемых материалов, а именно, возможность их использования в агрессивных средах с преобладанием процессов электрокоррозионного износа, была поставлена задача провести анализ структуры и морфологии исходной поверхности получаемых покрытий, а также поверхности, подвергнутой механическим воздействиям.

С целью оптимизации параметров технологических процессов на основе рассматриваемого метода была также исследована морфология поверхностей

различных материалов (титан, нержавеющая сталь, алюминий), наносимых на медную подложку.

2. МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Известно [2], что особенностью взаимодействия ИСПЭ с поверхностями металлов и сплавов является расположение зоны максимального энерговыделения на глубине порядка 1/3 длины пробега частицы в веществе. При условии, что толщина облучаемой фольги соизмерима с длиной свободного пробега электрона, ее материал может выноситься в режиме абляции со стороны, противоположной первичному воздействию пучка. Предварительно проведенными исследованиями нами установлено [3], что скорость выносимого вещества может достигать десятков километров в секунду. Разработанный нами метод включает облучение сильноточным РЭП микросекундной длительности слоя наносимого материала с его расплавлением и последующей наплавкой на поверхность подложки. Существенной особенностью разработанного метода наплавки является то, что слой расположен на некотором расстоянии от подложки, а электронный пучок в промежутке между слоем и подложкой подвергается деструкции.

Испаряющаяся под воздействием сильноточного электронного пучка часть слоя не попадает на подложку, но другая, расплавленная его часть, приводится в реактивное ускоренное движение по направлению к подложке. Подзаряжаясь пучком и получая дополнительное ускорение за счёт электростатического притяжения к заземлённой подложке, расплавленный пучком слой с большой скоростью налетает на практически холодную поверхность и частично расплавляет её. Материал слоя смешивается с материалом подложки и вступает с ним в химическую реакцию в специфических условиях.

При закалке из жидкого состояния результат структурных и фазовых превращений определяется

возникающим давлением в расплавах, которое при скорости налетающей жидкости ~ 100 м/с достигает значений $(3 \cdot 10^8) \dots (3 \cdot 10^9)$ Па [4].

Эксперименты проводились на импульсном сильноточном ускорителе электронов ТЕМП-А в режиме разовых посылок. Формирование и ускорение сильноточного релятивистского пучка электронов (СРЭП) длительностью $\tau_{\text{имп}} = (3 \dots 5) \cdot 10^{-6}$ с происходило в вакууме $P = 10^{-6} \dots 10^{-5}$ Торр, в диоде с магнитной изоляцией (Рис. 1).

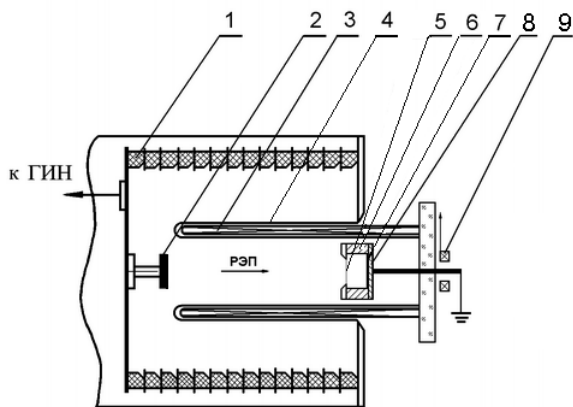


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – ускорительная колонка; 2 – катод; 3 – соленоид; 4 – анод; 5 – фольга; 6 – железное кольцо; 7 – подложка; 8 – коллектор; 9 – пояс Роговского

Электронный пучок, размер и условия распространения которого контролировались внешним магнитным полем, направлялся на заземленную подложку 7. Изменением магнитного поля и формы взрывоэмиссионного катода 2 добивались однородного распределения плотности тока в пучке, необходимого для равномерного нанесения покрытий. Покрытие наносилось за один импульс разрядного тока.

Наплавляемая на подложку фольга 5 укреплялась на заземленном коллекторе 8 на некотором расстоянии от подложки. Для уменьшения нагрева подложки фольга крепилась на полом железном цилиндре 6, ослабляющем внешнее магнитное поле в области пролета фольги до подложки, вследствие чего электронный пучок в этой области расфокусировывался и поглощался на внутренних стенках цилиндра. При этом, варьируя степень расфокусировки пучка, можно было менять соотношение тока электронов, попадающих на стенки цилиндра и на поверхность подложки, управляя тем самым степенью нагрева подложки, что имеет важное технологическое значение.

Следует отметить, что формируемый в ускорителе ТЕМП-А электронный пучок имеет значительный разброс по энергиям электронов от 0,1 до 0,5 МэВ, так что расфокусировке в области ослабленного магнитного поля подвергается только высоко-энергетическая часть пучка, прошедшая сквозь фольгу. Низкоэнергетические электроны, составляющие большую часть пучка, поглощаются материалом фольги на глубине 30...80 мкм. Именно поглощение низкоэнергетических электронов пучка приводит к нагреву фольги, ее расплавлению и испарению по-

верхностных атомов, передающих остальной части фольги ускоряющий импульс по направлению к подложке.

Наличие зазора между наносимым слоем и подложкой позволяет вводить энергию пучка, в основном, только в наносимый материал. Подвергая пучок деструкции в зазоре между наносимым слоем и подложкой, можно контролировать нагрев подложки, что расширяет технологические возможности описываемого метода нанесения покрытий.

Плотность мощности (q) электронного пучка, облучающего слой, выбирается в диапазоне $(5 \cdot 10^{10}) \dots (5 \cdot 10^{12})$ Вт/м². Плотность мощности $q < 5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² является недостаточной для интенсивного испарения слоя с поверхности и для приведения его в ускоренное движение по направлению к подложке. При $q > 5 \cdot 10^{12}$ Вт/м² наступает неприемлемый для нанесения покрытий режим абляции, когда пучок испаряет слой без его существенного расплавления и уносит его в противоположную от подложки сторону за счет образования газоплазменного факела [3].

3. МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ИСПАРЯЕМОГО МАТЕРИАЛА

Интенсивное истечение вещества под воздействием электронного пучка приводит наносимый слой в ускоренное движение. Летящий к подложке слой в начальной стадии полета продолжает облучаться электронами пучка, заряжаясь отрицательно. В жидком слое, находящемся под воздействием сил поверхностного натяжения, развивается гидродинамическая неустойчивость типа неустойчивости Релей-Тейлора. При возникновении небольших возмущений поверхности силы электростатического расталкивания увеличивают эти возмущения вплоть до разрыва жидкого слоя на капли. На Рис. 2 представлены снимки продуктов абляции титана и нержавеющей стали, осажденных на медную поверхность.

Как видно, сплошность осаждаемого покрытия нарушается. Время возникновения Релей-Тейлоровской гидродинамической неустойчивости $\tau \approx \gamma_{rt}^{-1}$, где γ_{rt} – инкремент неустойчивости,

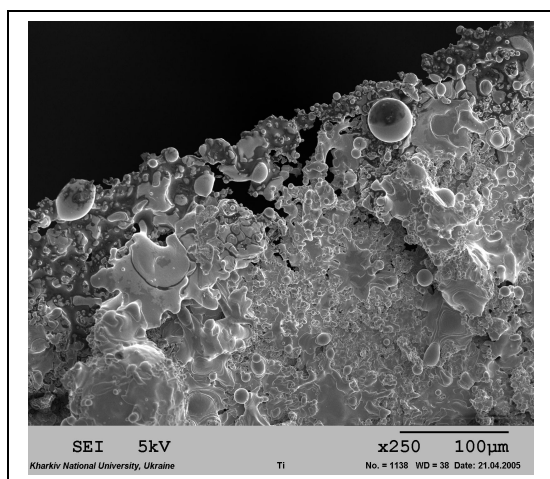
$$\gamma_{rt} \approx \frac{2}{d^2} \sqrt{\frac{\sigma \cdot D}{\rho}}$$

(σ – эффективный коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; D – характерный поперечный размер летящего слоя, м; d – толщина слоя, м; ρ – плотность вещества слоя, кг/м³).

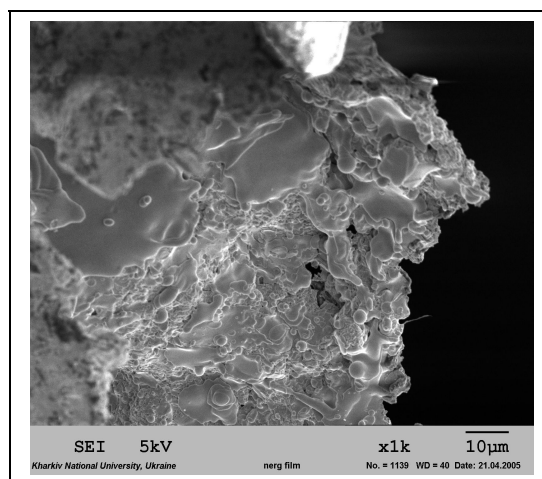
Это время определяет максимальное расстояние от подложки, на котором может находиться слой. Закон реактивного движения слоя под воздействием облучения электронным пучком имеет вид:

$$Z = \frac{L \cdot \rho \cdot d \cdot V}{q} \{-\tau - \ln|1 - \tau|\}, \quad \tau = \frac{q}{L \cdot \rho \cdot d} \cdot t, \quad (1)$$

где q – плотность мощности пучка, Вт/м²; L – удельная энергия испарения, Дж/кг; V – скорость истечения вещества с облучаемой поверхности, м/с; t – время, с.



а



б

Рис.2. Фрактограммы материала мишени из титана (а) и нержавеющей стали (б), осажденного на поверхности медной пластины

При $\tau \ll 1$ формула (1) приобретает вид:

$$Z = \frac{L \cdot \rho \cdot d \cdot V \cdot \tau^2}{q \cdot 2} \quad (2)$$

Расстояние Z_d , при котором наступает каплеобразование, получают подстановкой γ_{rt}^{-1} в формулу(2):

$$Z_d = 2 \cdot \frac{q \cdot d^3 \cdot V}{L \cdot \sigma \cdot D} \quad (3)$$

Достаточно наличия развитой гидродинамической неустойчивости, чтобы заряженная жидкость раздробилась на капли. Минимальное расстояние слоя от подложки определяется протяжённостью зоны деструкции Z_a , то есть области, в которой электронный пучок рассеивается, снижая свою интенсивность до приемлемой величины. В случае транспортировки электронного пучка магнитным полем деструкцию пучка осуществляют ослаблением магнитного поля в промежутке между слоем и подложкой до величины, определяемой из условия:

$$\Omega = \frac{eB}{mc} \leq \frac{2}{\gamma_0} \cdot \omega_e, \quad (4)$$

где Ω – электронная циклотронная частота, рад/с; ω_e – электронная плазменная частота в промежутке слой-подложка, рад/с; γ_0 – релятивистский фактор; B – индукция магнитного поля, Тл; m – масса электрона, кг; e – заряд электрона, Кл; c – скорость света, м/с.

При выполнении условия деструкции (4) нарушается транспортировка пучка, и он рассеивается под действием центробежных и электростатических сил в радиальном направлении. Анализ процесса распространения пучка в промежутке слой-подложка показывает, что минимальная протяжённость зоны деструкции вдоль оси пучка, необходимая для достаточного ослабления прошедшего через слой пучка, определяется формулой:

$$Z_a = 10^{-2} \cdot \frac{\sqrt{\delta}}{B} \cdot \left(\frac{D}{D_0} \right)^2,$$

где δ – степень деструкции пучка; D_0 – диаметр пучка, м.

В пределах указанного выше интервала находят оптимальное расстояние, обеспечивающее образование покрытия с требуемыми свойствами.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Способ апробировался при нанесении покрытия на подложку, изготовленную из меди марки М1. Слой, подлежащий расплавлению с испарением, представлял собой алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм. Исследования проводились на ускорителе ТЕМП-А [5]. Слой облучали сильноточным релятивистским электронным пучком с параметрами: ток пучка $I_n = 1 \dots 5$ кА; ускоряющее напряжение $E_n = 0,3 \dots 0,5$ МэВ; длительность пучка $\tau = 2 \dots 5$ мкс; площадь сечения пучка 10 см². Расстояние Z между слоем и подложкой выбирали в соответствии с соотношением $Z_a < Z < Z_d$, где Z_a – протяжённость зоны деструкции; Z_d – расстояние, на котором происходит каплеобразование. Z_d определяли по формуле (2) с учетом условий эксперимента: $d = 100$ мкм; $L = 10,88 \cdot 10^6$ Дж/кг; $V = 1600$ м/с; $\sigma = 0,91$ Н/м; $D = 0,01$ м; $q = (5 \cdot 10^{10}) \dots (5 \cdot 10^{12})$ Вт/м². Поэтому, например, для $q = 5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² расстояние Z_d равно 1,6 мм, а для $q = 5 \cdot 10^{12}$ Вт/м² $Z_d = 160$ мм. Промежуток между слоем и подложкой экранировали от транспортирующего магнитного поля цилиндром из армо-железа толщиной 20 мм. Магнитное поле транспортировки B составляло в опытах 0,8 Тл. При $\delta = 2 \dots 200$ и $D/D_0 = 1/6$, протяжённость зоны деструкции составляет 0,7...7 мм.

Экспериментально было установлено (Рис.3), что покрытие с наиболее высоким качеством поверхности и хорошим сцеплением с подложкой образовывалось при $q = 4 \cdot 10^{11}$ Вт/м² и $Z = 6$ мм. Морфологию поверхности покрытия и микрошероховатость опре-

деляли на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-840.

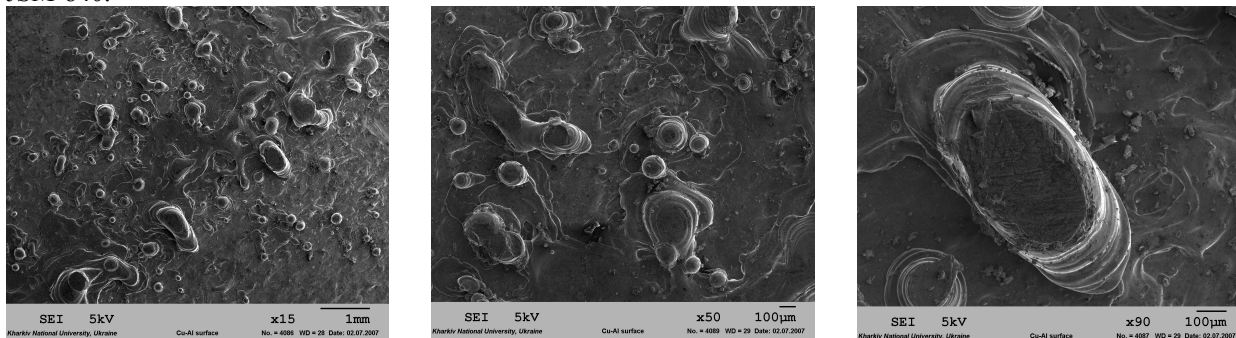


Рис.3. Изображения покрытия алюминия на медной подложке, полученные на растровом электронном микроскопе при различном увеличении

При облучении фольги без дополнительной деструкции остаточного пучка микротвёрдость покрытия уменьшалась. Если расстояние между слоем и подложкой превышает Z_d , то даже при осуществлении деструкции остаточного пучка нарушается сплошность покрытия из-за каплеобразования в результате развития гидродинамической неустойчивости расплавленного слоя.

На Рис.4 показаны изображения поверхности, подвергнутой изгибу с целью возникновения микро-разрывов покрытия и оценки его фрактограмм. Как видно из структуры образовавшихся разрывов, излом происходил по вязкому механизму, что говорит о достаточно мелкозернистой структуре материала покрытия.

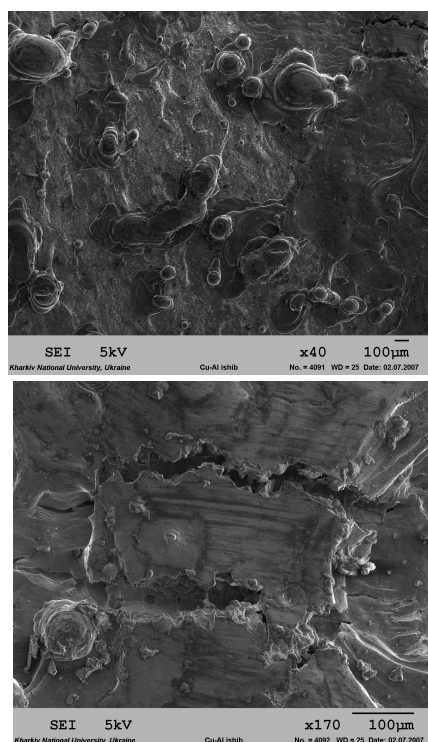


Рис.4. Изображения покрытия, подвергнутого механическому изгибу

Как показали результаты рентгеноструктурного анализа, покрытие, образовавшееся в результате взаимодействия слоя расплавленного алюминия с медной подложкой, состоит из двух алюминидов Cu_9Al_4 и CuAl_2 с изменёнными параметрами решётки. Их

микротвёрдость H_{μ}^{50} составляет соответственно 4700 и 5490 МПа, что превышает твёрдость полученных известными способами фаз на 21 и 32%. Таким образом, совмещение высокотемпературного химического синтеза со сверхбыстрым охлаждением при больших давлениях позволяет получать и фиксировать в покрытиях метастабильные фазы и структуры.

ВЫВОДЫ

Релятивистские электронные высокопоточные пучки микросекундной длительности являются перспективным инструментом для нанесения упрочняющих и защитных покрытий. Преимущества метода заключаются в возможности получения метастабильных фаз на границе подложка-покрытие, обеспечивающих высокую адгезию и эксплуатационные свойства. Варьированием значений энергии частиц, мощности пучка, толщины фольги наносимого материала и расстояния до подложки можно реализовать широкий спектр технологических процессов получения покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Ф. Клепиков, А.В. Пашенко, А.Г. Пономарев и др. Дистанционное нанесение покрытий сильноточным релятивистским электронным пучком // *ФиХОМ*. 2006, №3, с.24-28.
2. В.И. Бойко, А.Н. Валяев, А.Д. Погребняк. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц // *Успехи физических наук*. 1999, т.169, №11, с.1243-1271.
3. А.Г. Толстолуцкий, В.В. Уваров, Н.С. Поддубко, и др. Голографическая интерферометрия динамики газоплазменного факела // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2003, №4(3), с.313-318.
4. Ю.В. Ефимов, В.Н. Дмитриев, Л.А. Рябцев. Сверхбыстрое охлаждение металлических расплавов при высоком внешнем давлении // *ФиХОМ*. 1988, №6, с.97-101.

5. В.Т. Уваров, Ю.В. Ткач, Н.П. Гадецкий,
Г.В. Скачек, А.Г. Пономарев, В.Ф. Кившик,
Н.И. Гапоненко, А.С. Козачек, Е.А. Прасол.
Получение высокопоточных пучков микро-

*кундной длительности с высоким к.п.д.:
Препринт ХФТИ 84-30, М.: «ЦНИИАтомин-
форм», 1984, 13 с.*

Статья поступила в редакцию 19.10.2007 г.

THE FORMATION OF STRENGTHENING COATS BY MICROSECOND DURATION HIGH-CURRENT RELATIVISTIC ELECTRON BEAM

*V.F. Klepikov, Yu.F. Lonin, V.V. Lytvynenko, A.V. Pashenko, A.G. Ponomarev, V.V. Uvarov, V.T. Uvarov,
V.I. Sheremet*

The method of remote drawing of strengthening coats by means of a high-current microsecond duration relativistic electron beam is developed. Experiments were performed using pulse electron accelerator TEMP-A in a single pulse generation regime. Parameters the REB were as follows: current 1...5 kA, electron energy up to 0.5 MeV, a pulse duration 2...5 μ s, a power density up to $5 \cdot 10^{12}$ W/m². The method consists in drawing of materials layer molten by electron beam on a cold substrate. With this melting of material occurs at some distance from a substrate that provides the melt's acceleration in a direction of a substrate and it melting away. The material of a coat immix with a material of a substrate and therefore initiate the corresponding chemical response in specific conditions of high pressure and temperatures that provides formation of coats with given in advance properties.

ВИКОРИСТАННЯ СИЛЬНОСТРУМОВОГО РЕП МІКРОСЕКУНДНОЇ ТРИВАЛОСТІ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЗМІЦНЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ

*В.Ф. Клепиков, Ю.Ф. Лонін, В.В. Литвиненко, А.В. Пащенко, А.Г. Пономарьов, В.В. Уваров,
В.Т. Уваров, В.І. Шеремет*

Розроблений метод дистанційного нанесення зміцнюючих покриттів за допомогою сильнострумового релятивістського електронного пучка мікросекундної тривалості. Експерименти проводилися на імпульсному електронному прискорювачі ТЕМП-А в режимі поодиноких імпульсів. Параметри РЕП: струм 1...5 кА, енергія електронів до 0,5 МеВ, тривалість імпульсу 2...5 мкс, густина потужності до $5 \cdot 10^{12}$ Вт/м². Метод полягає в нанесенні шару розплавленого електронним пучком матеріалу на холодну підкладку. При цьому плавлення матеріалу, що наноситься, відбувається на деякій відстані від підкладки, що забезпечує прискорення розплавленого шару електронним пучком у напрямі підкладки та її оплавлення. Матеріал покриття змішується з матеріалом підкладки і вступає з ним в хімічну реакцію в специфічних умовах високого тиску і температури, що забезпечує формування покриттів із заданими наперед властивостями.