

УДК 621.9

Г. И. КОСТЮК, О. О. БРУЯКА, Е. А. ВОЛЯК

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР НА ОДНО-, ДВУХ- И ТРЕХКАРБИДНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Розглянуто можливості отримання наноструктур на одно-, дво- і трикарбідних сплавах при дії фемто- і пікосекундних лазерів. Визначено залежності максимальної температури, швидкості її росту і температурних напружень від щільності теплового потоку ( $10^{12}...10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) і за часу його дії від  $10^{-16}$  до  $10^{-12}$  с. Доведено, що великі температури, швидкості наростання температур і температурні напруження реалізуються для трикарбідного твердого сплаву ТТ20К9, найменші – для однокарбідного твердого сплаву ВК4. Аналіз швидкостей зростання показує, що для всіх досліджених режимів вона перевищує необхідну для утворення наноструктур –  $10^7$  К/с. Максимальні температурні напруження для ряду режимів перевищують  $10^{10}$  Па, що дозволяє отримувати безпосередньо наноструктури за рахунок дії температурних напружень, а для широкого кола режимів вони істотно прискорюють процес утворення наноструктур. Отримані значення об'єму зерна і глибин його залягання дозволили знайти технологічні режими для отримання наноструктур. Подані залежності обсягу наноструктур від технологічних параметрів (щільності теплового потоку і часу його дії) дозволяють проводити експрес-оцінку технологічних параметрів отримання наноструктур.

**Ключові слова:** наноструктури, фемто- і піко секундні лазери, щільність теплового потоку, час дії лазера, твердий сплав одно-, дво-, трикарбідний.

Рассмотрены возможности получения наноструктур на одно-, двух- и трехкарбидных сплавах при действии фемто- и пикосекундного лазера. Определены зависимости максимальной температуры, скорости её роста и температурных напряжений от плотности теплового потока ( $10^{12}...10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) и при времени его действия от  $10^{-16}$  до  $10^{-12}$  с. Показано, что большие температуры, скорости нарастания температур и температурные напряжения реализуются для трехкарбидного твердого сплава ТТ20К9, наименьшие – для однокарбидного твердого сплава ВК4. Анализ скоростей роста показывает, что для всех исследованных режимов она превышает необходимую для образования наноструктур –  $10^7$  К/с. Максимальные температурные напряжения для ряда режимов превышают  $10^{10}$  Па, что позволяет получать непосредственно наноструктуры вследствие действия температурных напряжений, а для широкого круга режимов они существенно ускоряют процесс образования наноструктур. Полученные значения объёма зерна и глубины его залегания позволили найти технологические режимы для получения наноструктур. Представленные зависимости объёма наноструктур от технологических параметров (плотности теплового потока и времени его действия) позволяют проводить экспресс-оценку технологических параметров получения наноструктур.

**Ключевые слова:** наноструктуры, фемто- и пикосекундные лазеры, плотность теплового потока, время действия лазера, твердый сплав одно-, двух- трехкарбидный.

Discusses the possibility of producing nanostructures of one-, two- and three carbide hard alloys under the action of femtosecond and picosecond lasers. The dependence of the maximum temperature, the speed of its growth and thermal stresses of the heat flux density ( $10^{12}...10^{16}$  W/m<sup>2</sup>), and at times his actions from  $10^{-16}$  до  $10^{-12}$  s. It is shown that high temperatures, the rate of rise of temperature and thermal stresses are realized for three carbide WC71TiC20Co9, the least – for one carbide WC96+Co9. Analysis of growth rates shows that for all she studied modes higher than necessary for the formation of nanostructures –  $10^7$  K/s. The maximum thermal stress for a number of modes higher than  $10^{10}$  Pa, which allows to obtain the nanostructure is directly due to the effect of thermal stresses, and a wide range of modes they significantly accelerate the process of formation of nanostructures. The values obtained for the grain size and the depth of their occurrence it possible to find technological modes for nanostructures. Presented according to the volume of nanostructures on the technological parameters of the heat flux density and time of action allow for a rapid assessment of the technological parameters of obtaining nanostructures.

**Keywords:** nanostructures, femtosecond and picosecond lasers, heat flux, while the laser action, hard alloy single, double and three carbide.

**Введение.** Возможность применения одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавов определяется их работоспособностью и эффективностью, поэтому образование наноструктур (НС) в их поверхностном слое может существенно изменить их работоспособность и эффективность. Учитывая различную стоимость одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавов (ТС), важно определить, какой из них позволяет получать наномерно при работе лазера пико- и фемтосекундном диапазоне времени, что позволит выбрать технологические режимы их обработки и наиболее работоспособный и эффективный сплав.

Всё это говорит о важности своевременности проведения исследования влияния типа материала твердого сплава на их эффективность и работоспособность.

**Состояние вопроса.** В настоящее время существует значительное количество экспериментальных работ по исследованию и применению наноструктур [1–17]. Однако теоретических работ с учетом критериев образования наноструктур, энергии, затрачиваемой на кристаллизацию, и квантово-механических эффектов в настоящее время нет для случая действия ионизирующего излучения, хотя некоторые попытки

в этом плане проводились [16, 17], но в этом случае рассматривались классические режимы при относительно большом времени действия лазерного луча.

Проведенный анализ показывает, что оценка возможности получения наноструктур на одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавах является актуальной и важной задачей современного машиностроения.

**Постановка теоретической задачи исследования.** Решалась совместная задача теплопроводности и термоупругости, которая позволяет не только учесть все основные источники и истоки темпа, но и проследить динамику преобразования энергии деформирования в тепло и в создание остаточных напряжений.

В результате решения этой задачи определялись температуры, скорости изменения температуры, температурных напряжений от плотности теплового потока ( $q = 10^{12}...10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) при времени его действия от  $10^{-16}$  до  $10^{-10}$  с, т. е. этот диапазон охватывает как пико-, так и фемтосекундные импульсы.

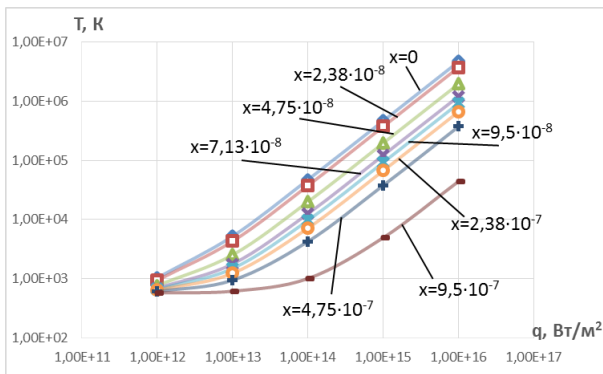
Также необходимо было найти объём наноструктуры, получаемой в каждом из исследованных режимов, что сводилось к нахождению области материала, где выполнялись условия для образования наноструктур по таким критериям: обеспечение требуемого

© Г. И. Костюк, О. О. Бруяка, Е. А. Воляк, 2016

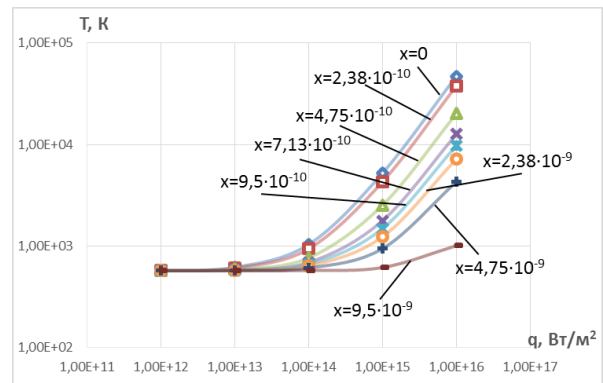
диапазона температур, скоростей роста температур более, чем в  $10^7$  К/с, и обеспечение действия температурных напряжений, ускоряющих образование НС ( $\sigma = 10^8 \dots 10^9$  Па) или реализация условий, когда есть вероятность образования наноструктур только вследствие действия температурных напряжений.

**Результаты исследований и их обсуждение.**

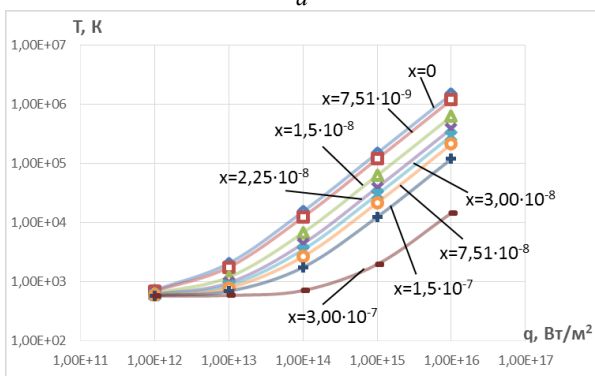
Проводилось исследование таких твердых сплавов: ВК4, Т5К10 и ТТ20К9. Видно, что во всем исследованном диапазоне времен для плотности теплового потока  $10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup> практически нет возможности получения наноструктур (рис. 1–3).



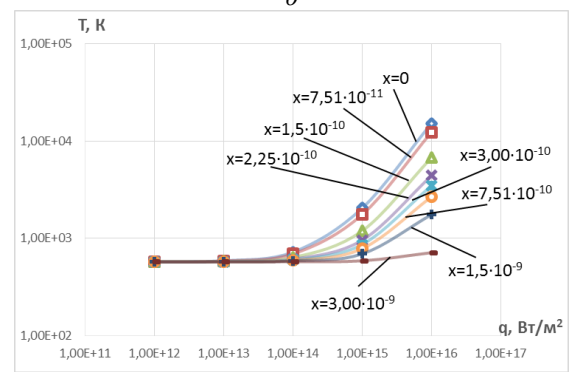
a



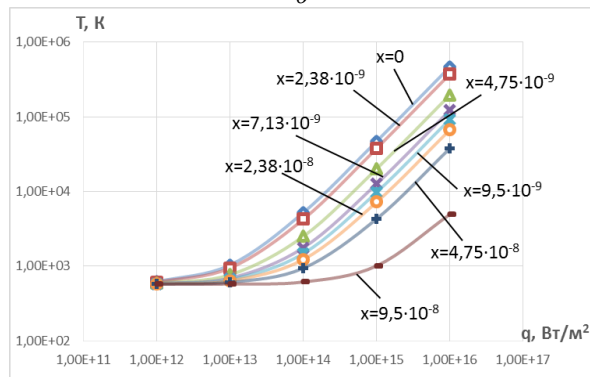
d



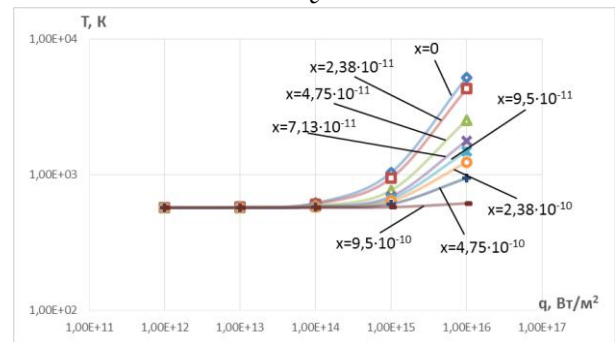
b



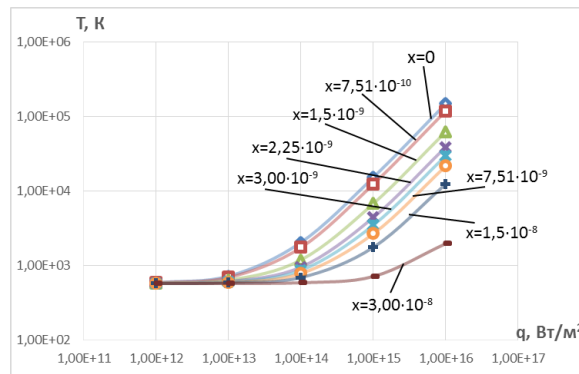
e



в



ж



z

Рис. 1 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия:

a –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; z –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; e –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

Повышение плотности теплового потока до  $10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup> приводит к тому, что НС для всех исследованных материалов образуются, начиная с времени  $t = 10^{-13}$  до  $10^{-10}$  с, причем большие температуры реализуются для трехкарбидного сплава ТТ20К9, наименьшие – для однокарбидного ВК4. Переход плотности теплового потока  $10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup> расширяет область времени действия теплового потока, при котором реализуются наноструктуры до  $10^{-15}$  с, но и в

этом случае для однокарбидных сплавов реализуются температуры меньше, чем для трехкарбидных. В зоне высокого времени действия наноструктуры образуются на глубине  $2,41 \cdot 10^{-7}$  м. С понижением времени действия эта глубина уменьшается и становится порядка  $10^{-7}$  и даже приближается к поверхности режущего инструмента (РИ), причем большие значения наблюдается для трехкарбидного ТС ТТ20К9, а наименьшие – для однокарбидного ВК4 (рис. 1–3).

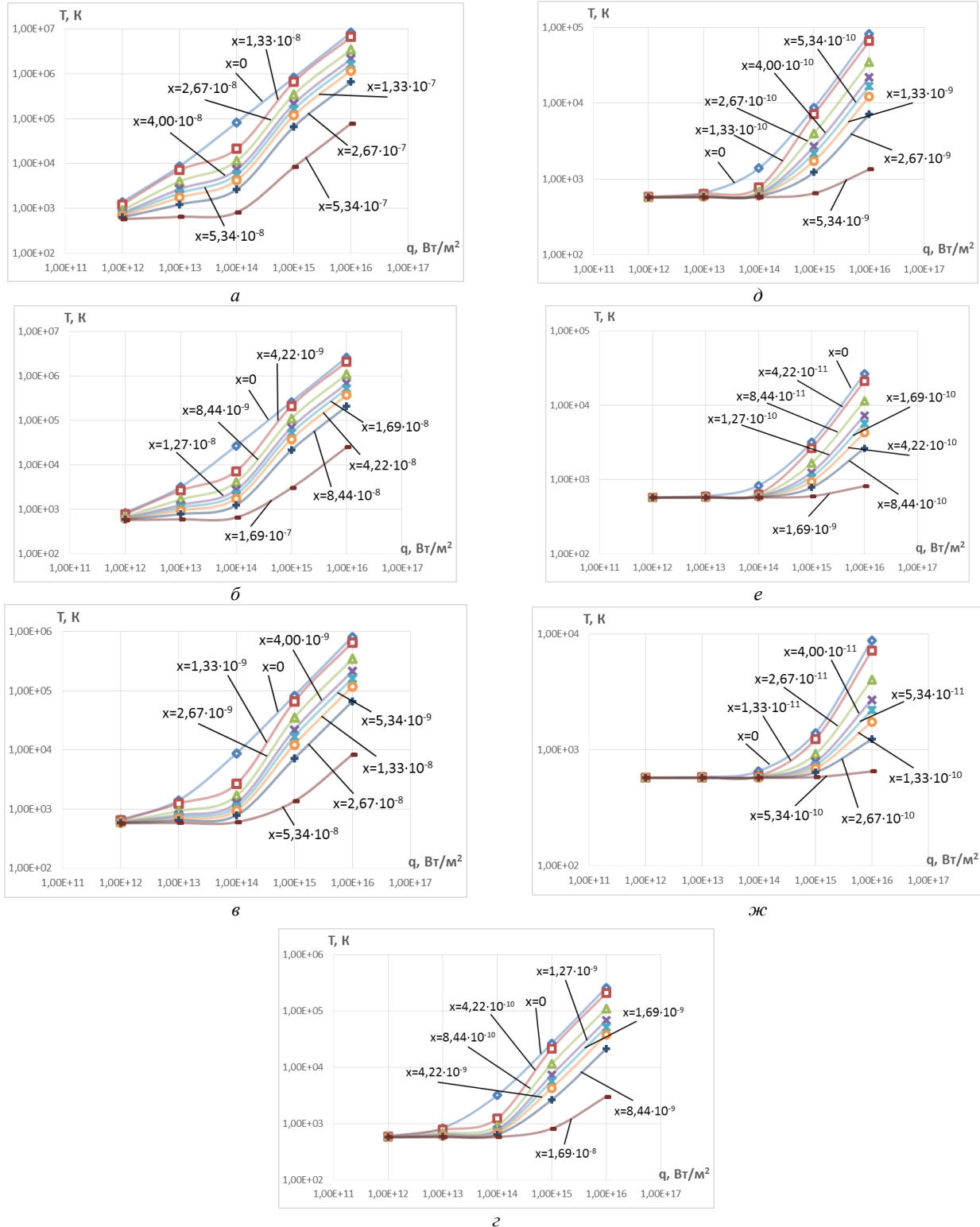


Рис. 2 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на Т5К10 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

Исследования остальных режимов при больших плотностях теплового потока  $10^{15}$  и  $10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> показывают, что в данном случае для всех режимов НС образуются на глубине, исключение составляют режимы от  $t = 10^{-15}$  до  $10^{-16}$  с, когда наноструктуры образуются даже на поверхности РИ, причем большие

глубины реализуются для трехкарбидного ТС (рис. 1–3). Анализ скоростей роста температур показывает, что практически во всех исследованных режимах скорость роста превышает  $10^7$  К/с, что говорит о том, что проверку по этому критерию в дальнейшем можно не проводить (рис. 4–6).

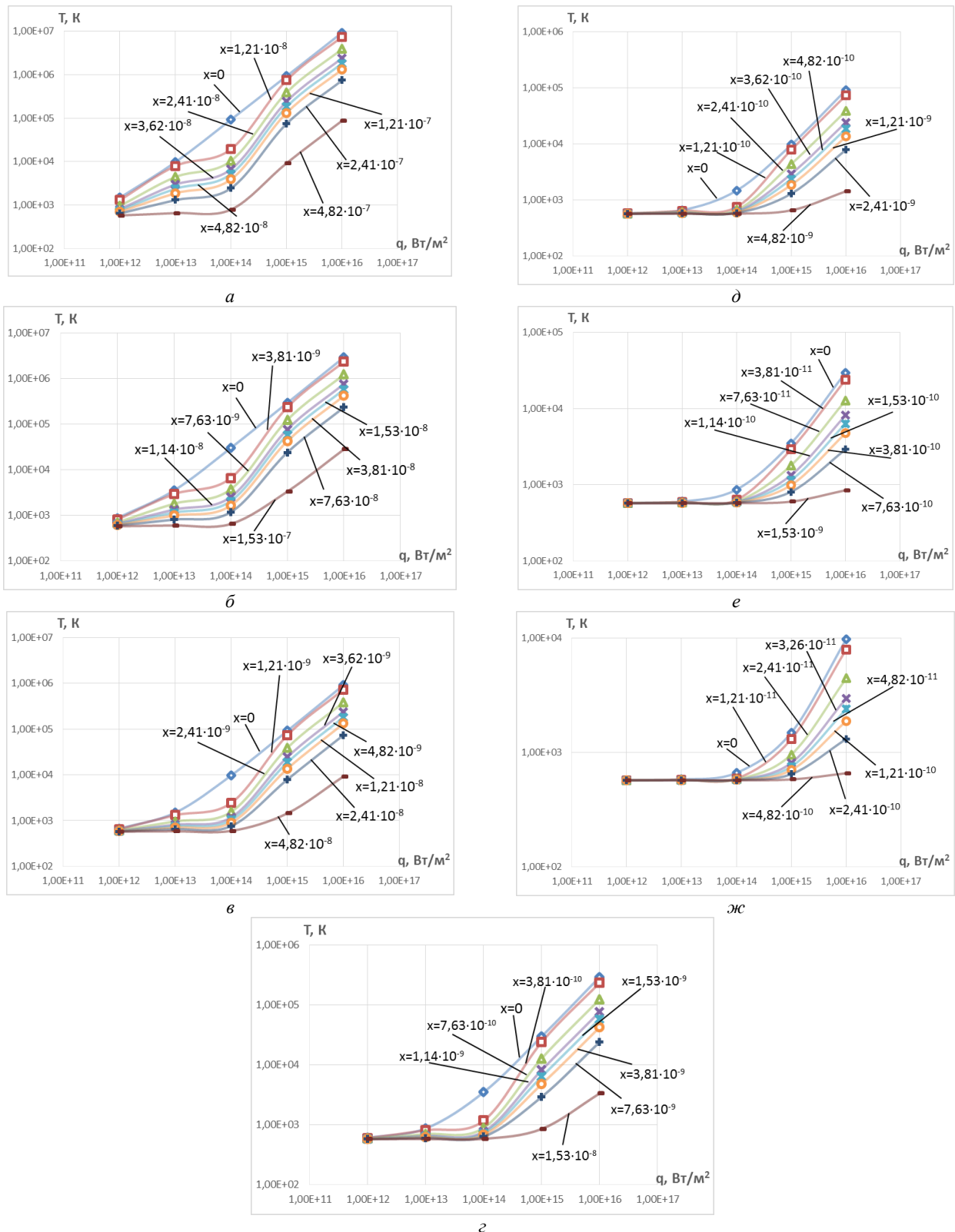


Рис. 3 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на ТТ20К9 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

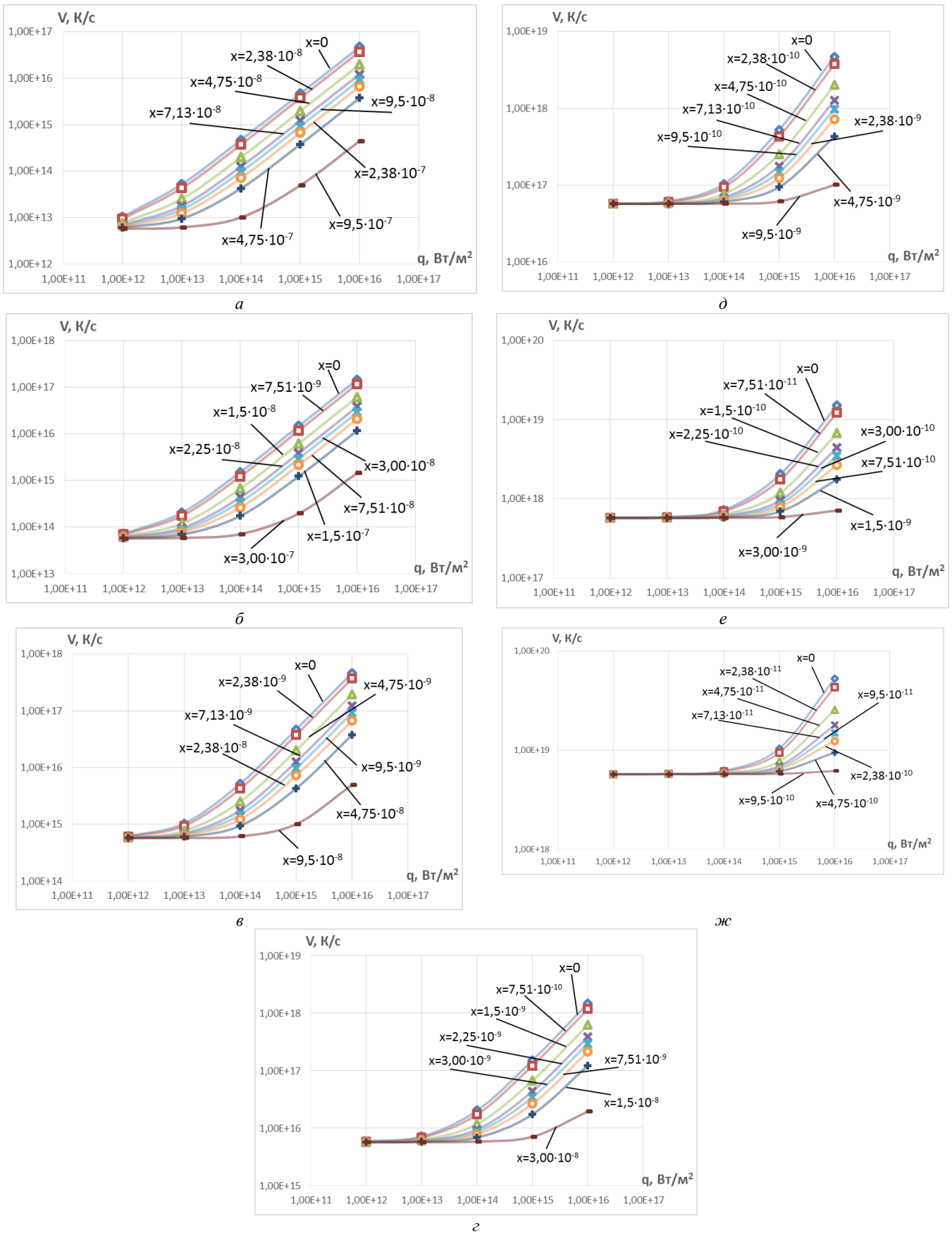


Рис. 4 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: *a* –  $t=10^{-10}$  с; *б* –  $t=10^{-11}$  с; *в* –  $t=10^{-12}$  с; *г* –  $t=10^{-13}$  с; *д* –  $t=10^{-14}$  с; *е* –  $t=10^{-15}$  с; *ж* –  $t=10^{-16}$  с

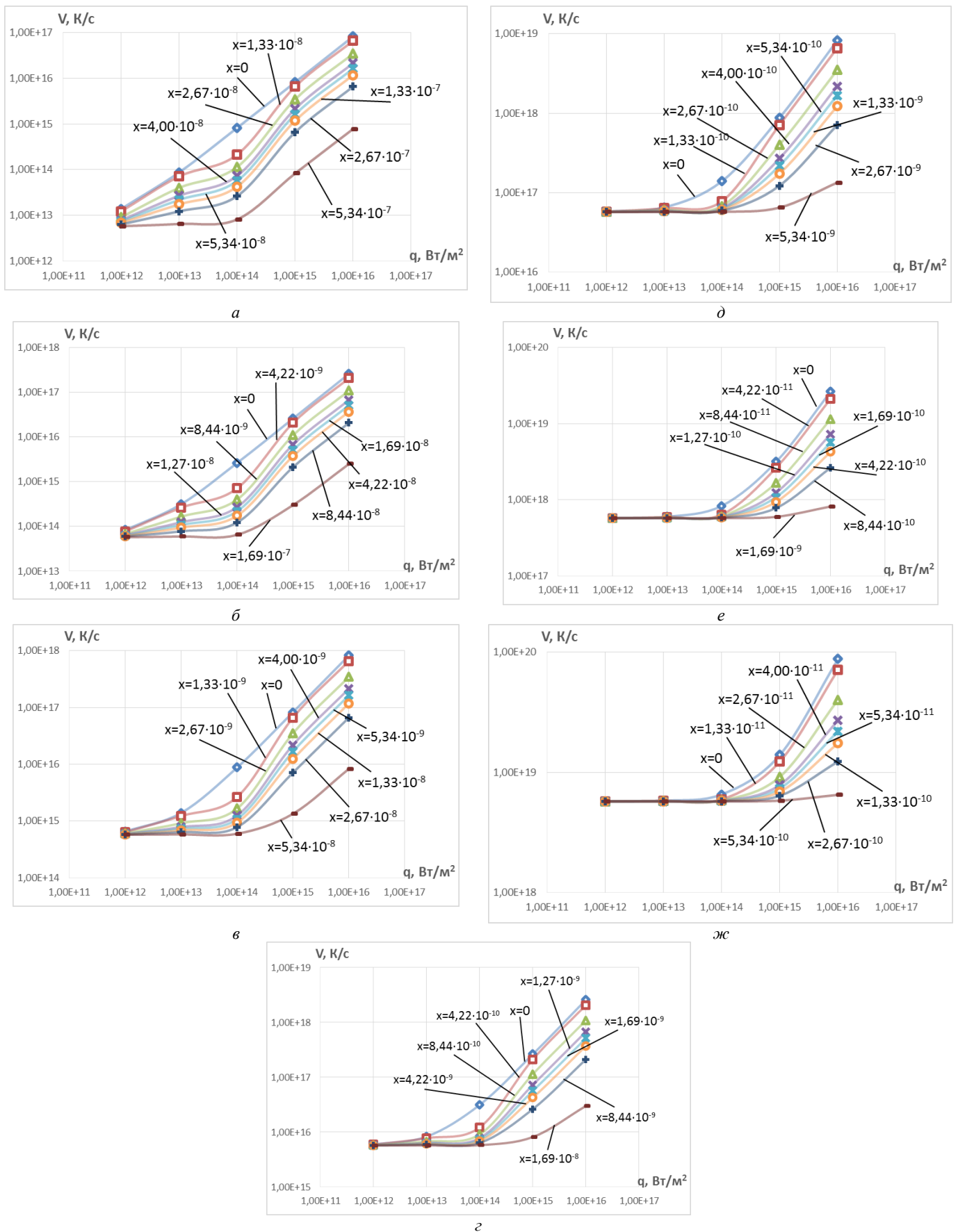


Рис. 5 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на Т5К10 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

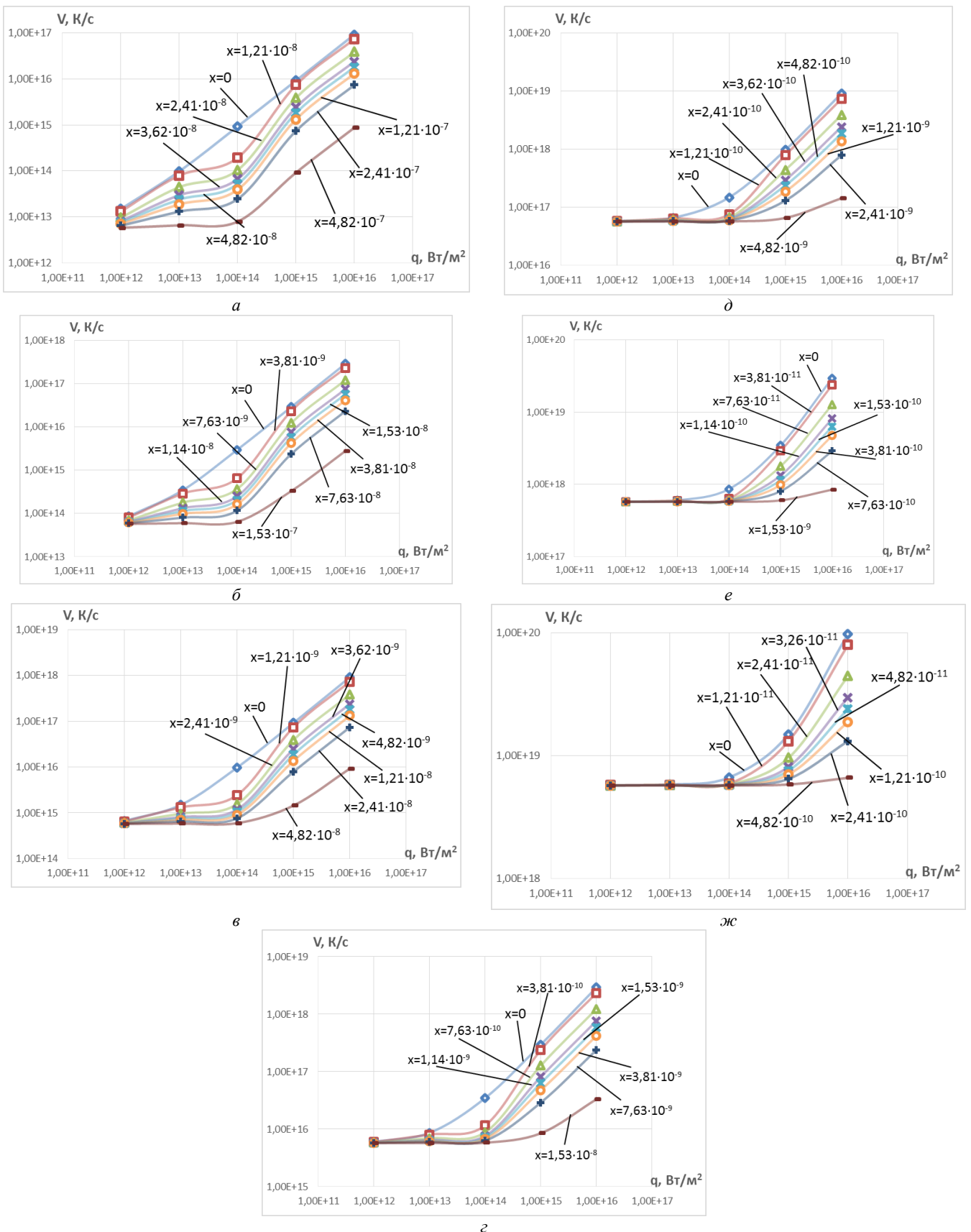


Рис. 6 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на ТТ20К9 от плотности теплового потока на разной глубине  $x$  при времени действия:  $a - t=10^{-10}$  с;  $b - t=10^{-11}$  с;  $в - t=10^{-12}$  с;  $г - t=10^{-13}$  с;  $д - t=10^{-14}$  с;  $е - t=10^{-15}$  с;  $жс - t=10^{-16}$  с

Величины температурных напряжений существенно отличаются практически для всех режимов в

зависимости от количества карбидов, участвующих в образовании ТС, причем значительно большие реали-

зуються для тріхкарбидного, а мінімальні – для однокрбидного. Для режимів при  $q = 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup> єсть можливість суттєвого прискорення утворення наноструктур, а при  $q = 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup> уже в двох режимах при  $t = 10^{-11} - 10^{-10}$  с (рис. 7–9). С ростом теплового потоку ( $q = 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>) з'являється можливість навіть непрямого утворення НС внаслідок дії температурних напружень на незначительних глибинах порядку  $10^{-8}$  і  $10^{-9}$  м. Для  $q = 10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup> єсть можливість отримання наноструктур внаслідок

дії температурних напружень при часі  $10^{-13} \dots 10^{-10}$  с. В разі максимального теплового потоку ( $q = 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) єсть можливість утворення наноструктур при часі  $10^{-14} \dots 10^{-10}$  с, але як наноструктури звичайно реалізуються при двохосному стисненні, то єсть ймовірність того, що наноструктури можуть бути не утворені з-за того, що відносно іншої взаємно перпендикулярної осі значення температурних напружень можуть виявитися значно нижче досліджуваних (рис. 7–9).

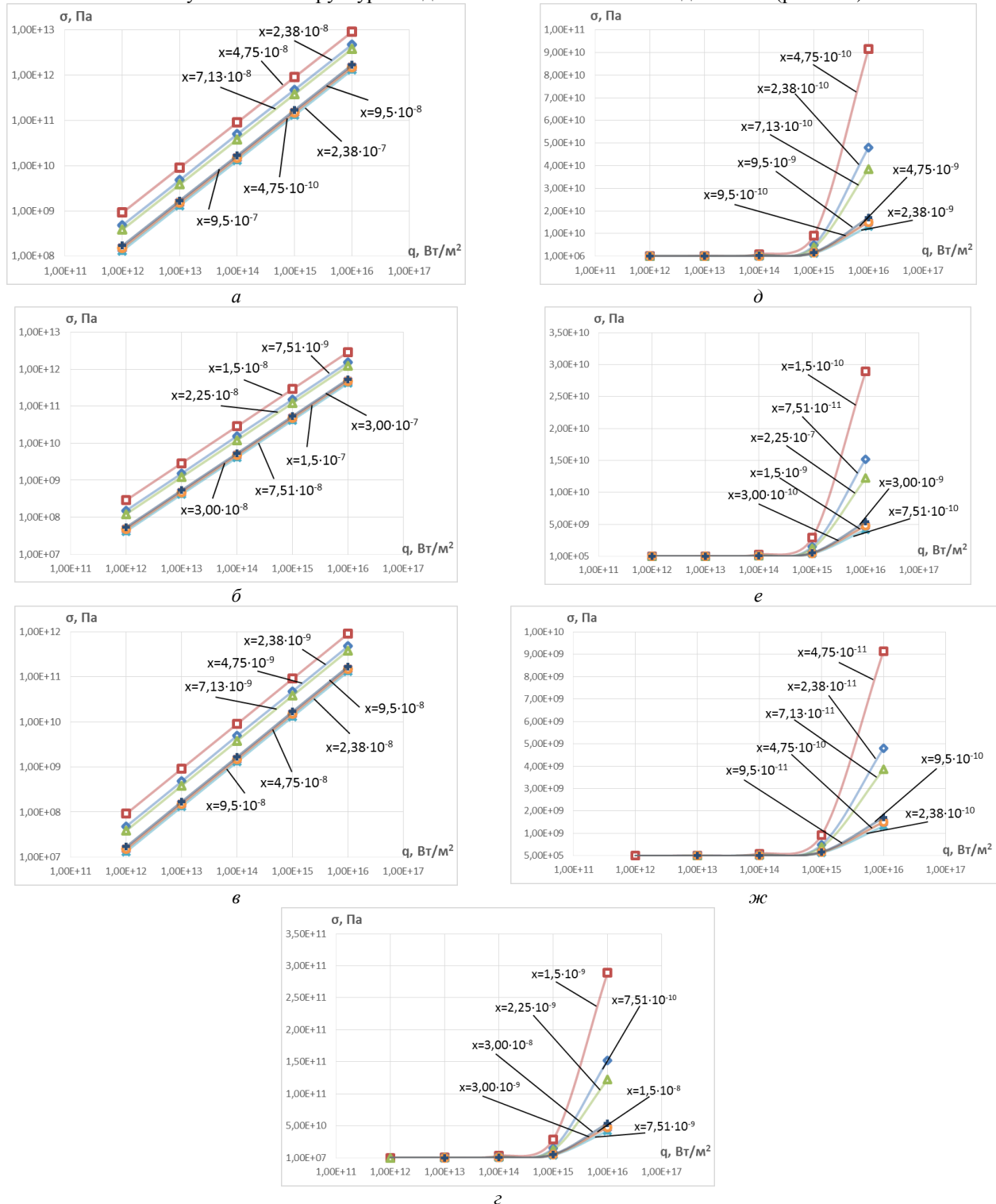


Рис. 7 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от плотности теплового потока на разной глубине  $x$  при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с



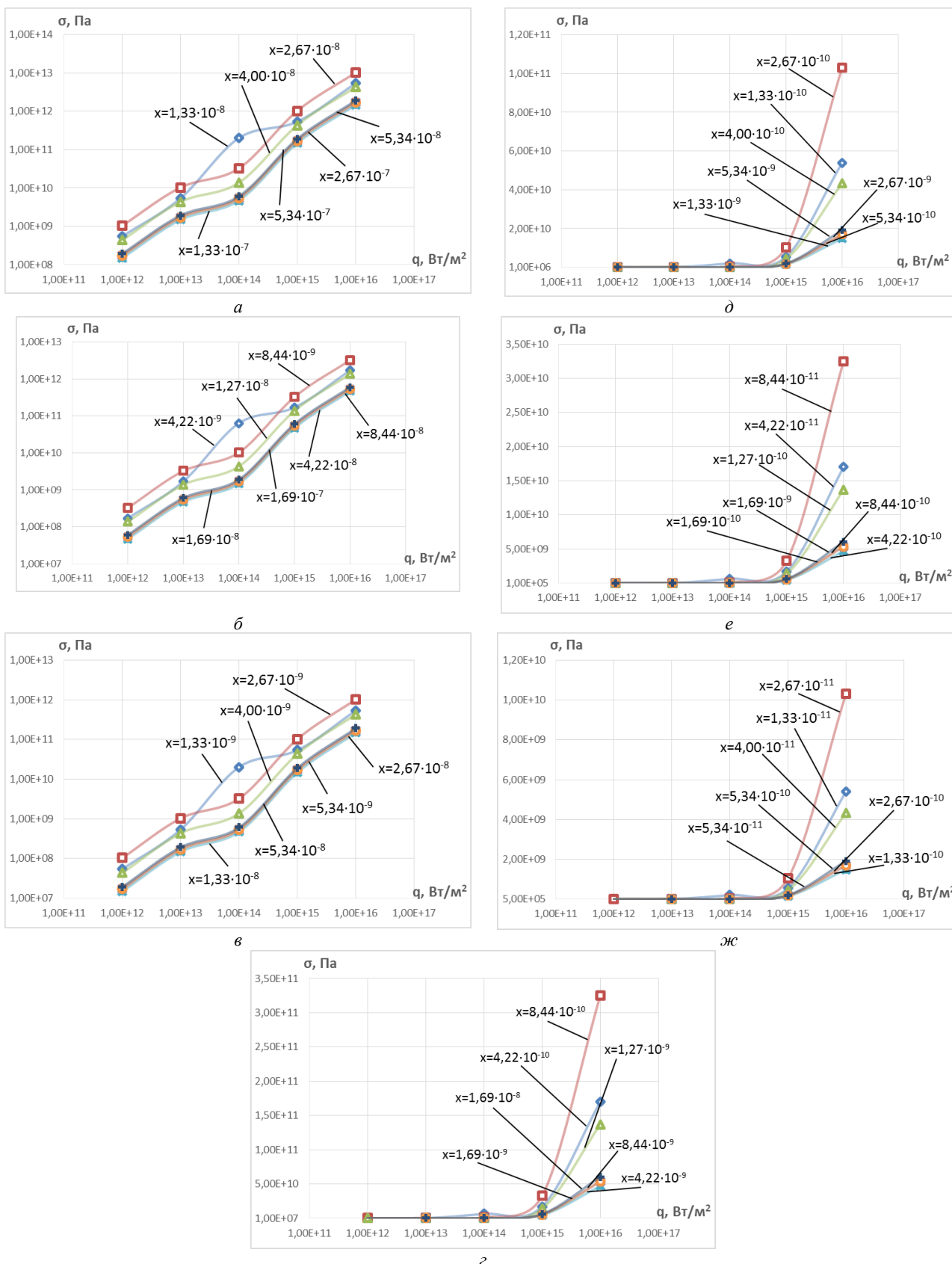


Рис. 8 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на T5K10 от плотности теплового потока на разной глубине  $x$  при времени действия:  
*a* –  $t=10^{-10}$  с; *б* –  $t=10^{-11}$  с; *в* –  $t=10^{-12}$  с; *г* –  $t=10^{-13}$  с; *д* –  $t=10^{-14}$  с; *е* –  $t=10^{-15}$  с; *ж* –  $t=10^{-16}$  с

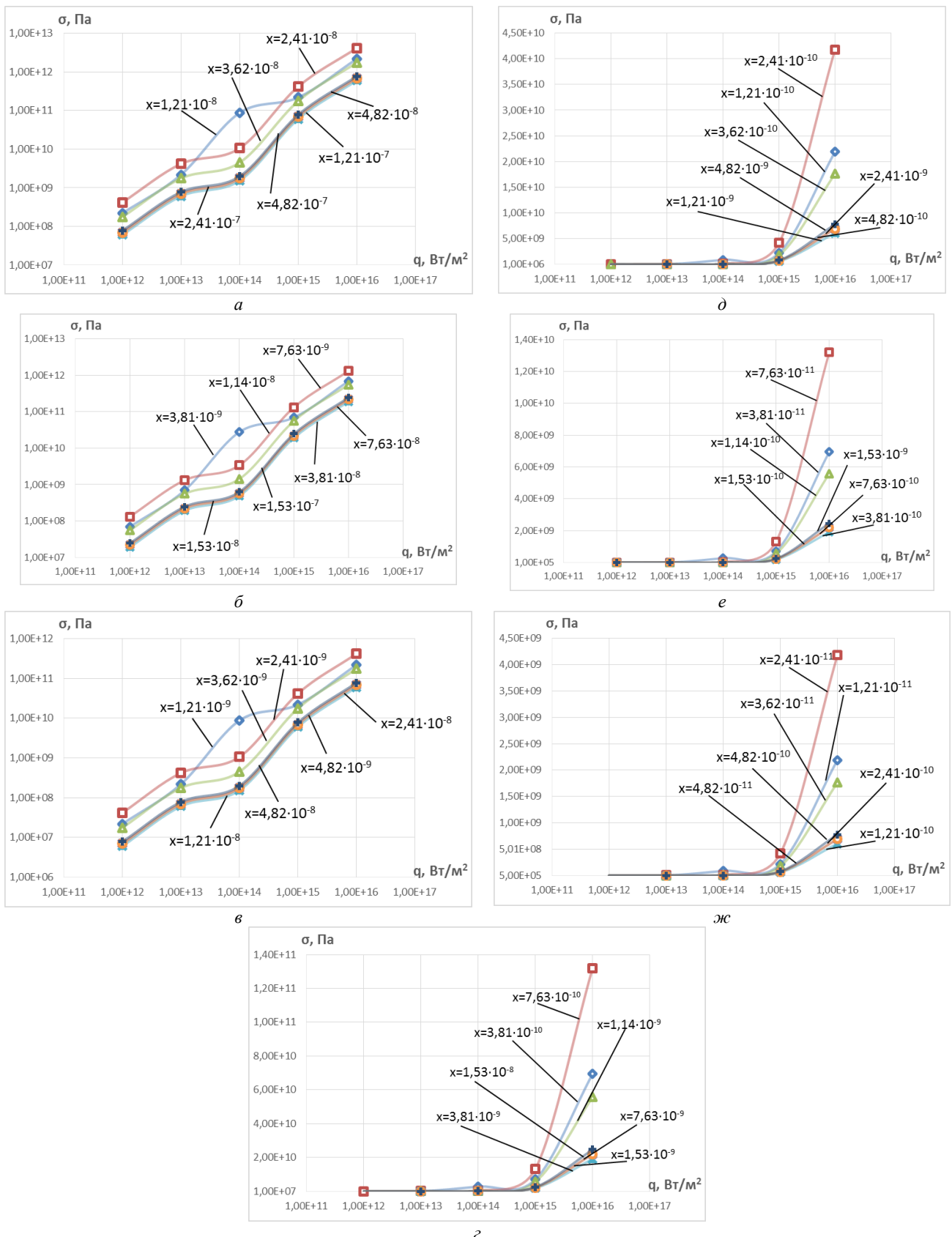


Рис. 9 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на ТТ20К9 от плотности теплового потока на разной глубине  $x$  при времени действия:  
 а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

Так как важными характеристиками для получения наноструктурных слоев являются объемы НС и глубина их залегания, то для исследованных сплавов были построены зависимости объема нанокластера от

минимальной и максимальной глубины залегания (рис. 10–12 для сплавов ВК4, Т5К10, ТТ20К9 соответственно). Видно, что объёмы структур существенно уменьшаются в обратном порядке: для ВК4 наблюда-

ется наибольший объём, а для ТТ20К9 – наименьший, что говорит о том, что вероятность появления наноструктур больше для твердого сплава ТТ20К9 (рис. 10–12).

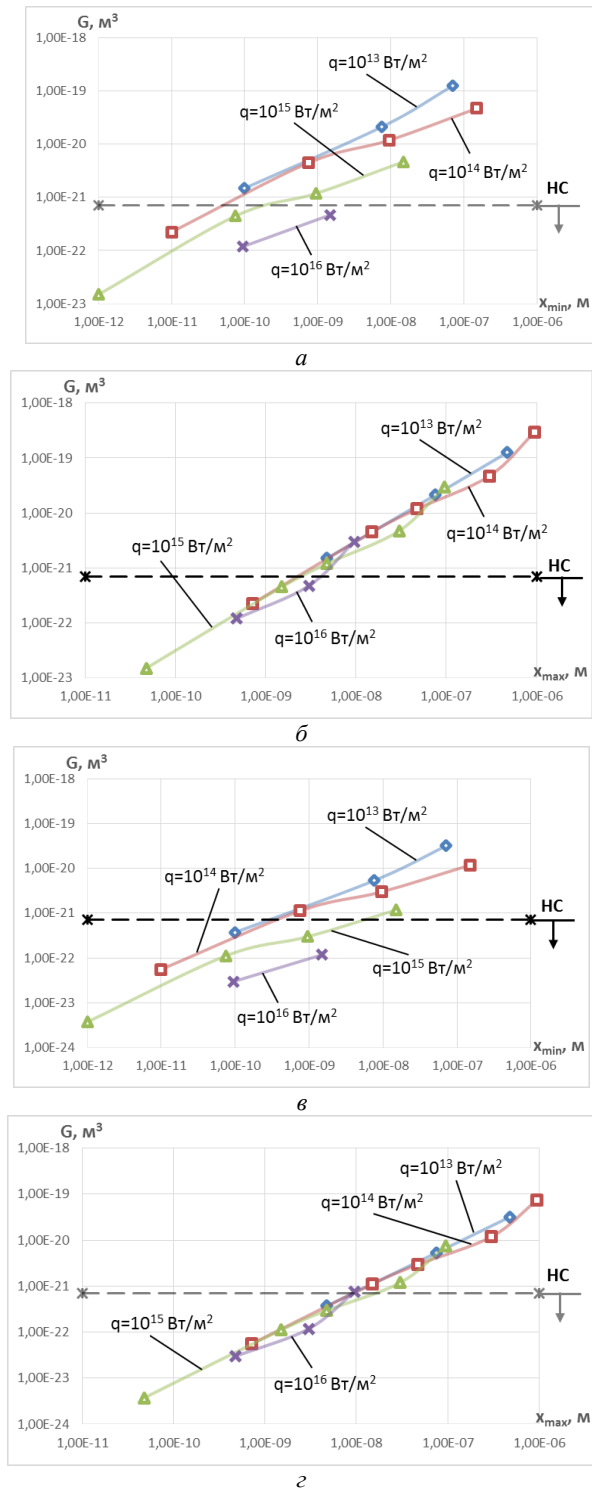


Рис. 10 – Зависимость объёма нанокластера от минимальной (а, в) и максимальной (б, г) глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (ВК4) при  $R = 10^{-6}$  м (а, б) и  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м (в, г) для ВК4

Для проведения экспресс-оценки технологических параметров получения наноструктур были построены пространственные картины зависимости размера нанозерна от плотности теплового потока и вре-

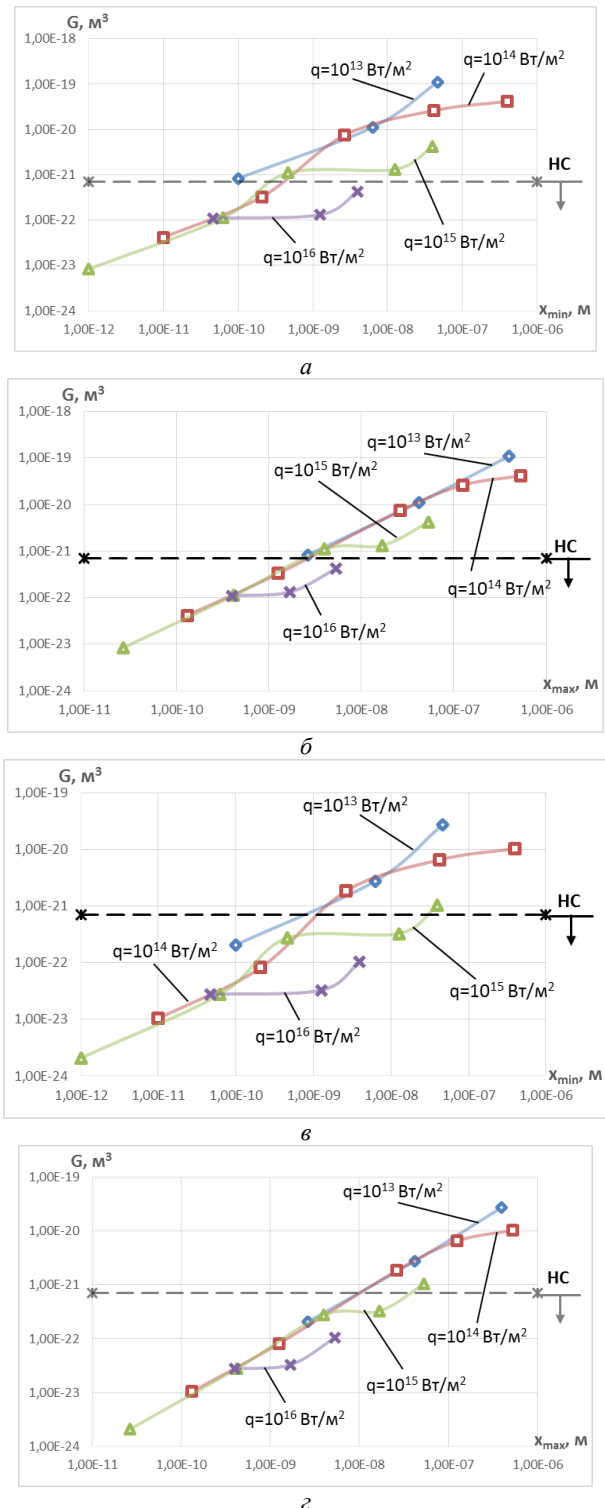
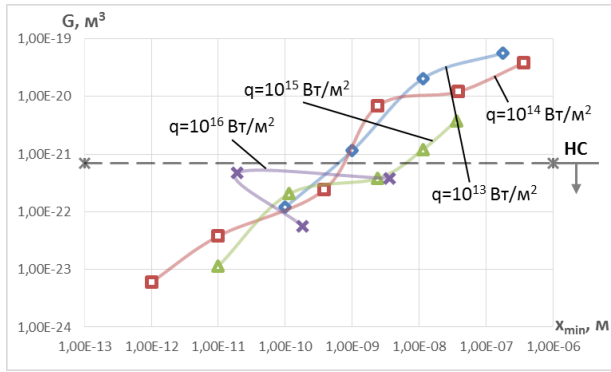


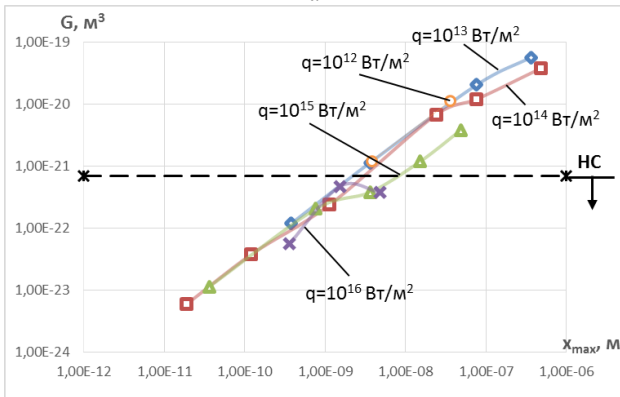
Рис. 11 – Зависимость объёма нанокластера от минимальной (а, в) и максимальной (б, г) глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (Т5К10) при  $R = 10^{-6}$  м (а, б) и  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м (в, г) для Т5К10

мени его действия для фемто- и пикосекундного лазера, которые показаны на рис. 13 - 15. Здесь также видно, что области технологических параметров, при которых реально возможно получение наноструктур,

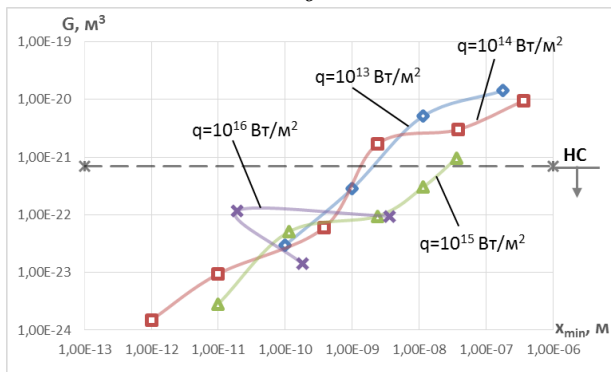
для ТТ20К9 значительно больше, чем для Т5К10 и тем более ВК4.



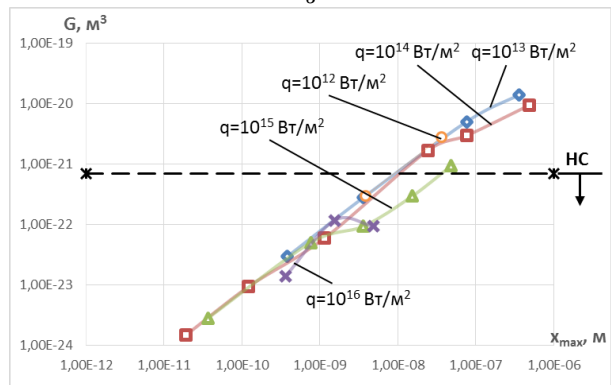
а



б

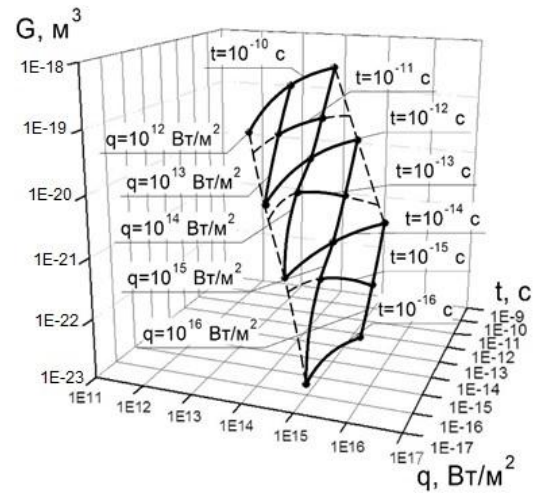


а

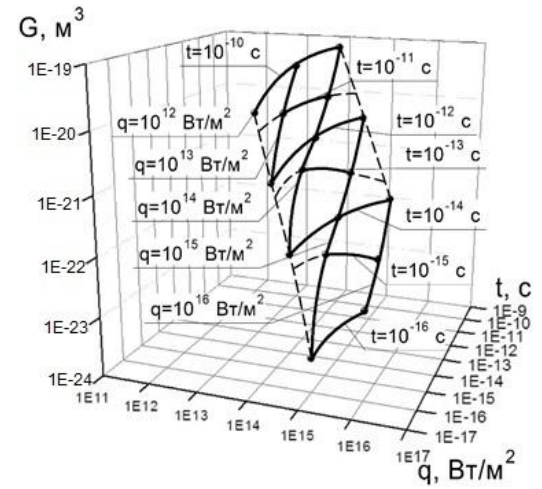


б

Рис. 12 – Зависимость объема нанокластера от минимальной (а, в) и максимальной (б, г) глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (ТТ20К9) при  $R = 10^{-6}$  м (а, б) и  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м (в, г) для ТТ20К9

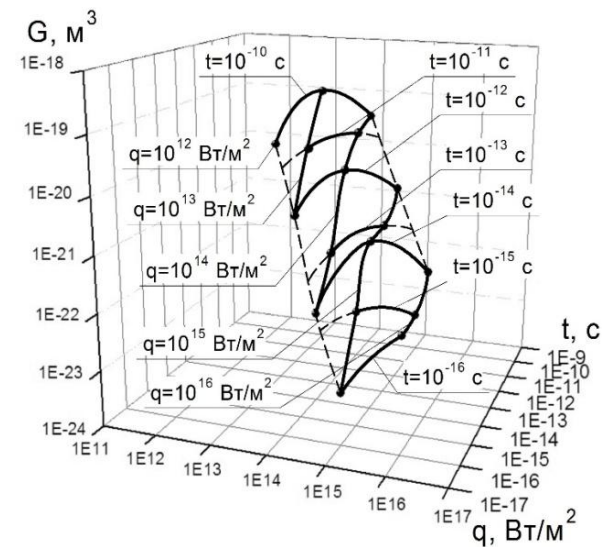


а



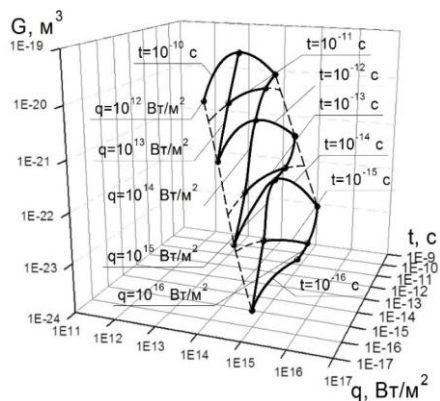
б

Рис. 13 – Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры при  $R = 10^{-6}$  м (а) и  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м (б) для ВК4

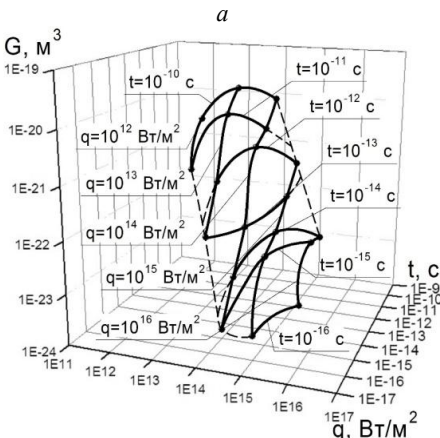
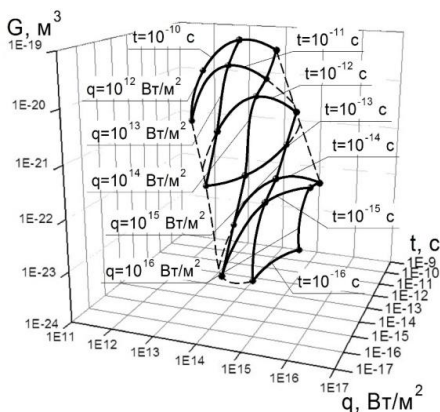


а

Рис. 14 – Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры при  $R = 10^{-6}$  м (а) и  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м (б) для Т5



б  
Рис. 14 – Окончание



а  
Рис. 15 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры при  $R = 10^{-6}$  м (а) и  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м (б) для ТТ20К9

### Выводы.

Исследование особенностей образования наноструктур на одно-, двух- и трехкарбидных сплавах при действии лазерного излучения при действии фемто- и пикосекундного лазера показало:

1. Максимальные температуры в зоне облучения реализуются для трехкарбидного ТС ТТ20К9, а наименьшие – для однокарбидного ВК4.
2. Скорости роста температур во всех исследованных режимах превышают  $10^7$  К/с, что говорит о том, что этот критерий выполняется в исследованных режимах.
3. Величины температурных напряжений для режимов с  $q > 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup> могут ускорять процесс образо-

вания наноструктур, а для  $q > 10^{14} \dots 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> есть реальная возможность получения наноструктур вследствие действия температурных напряжений.

4. Полученные объёмы наноструктур и глубины их залегания позволяют выбирать технологические параметры для получения наноструктур для исследования одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавов.

5. Полученные пространственные картины зависимости объёма наноструктур от плотности теплового потока и времени его действия позволяют проводить экспресс-оценку технологических параметров для получения наноструктур.

### Список литературы

1. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрывтиями и наноструктурными модифицированными слоями: Моногр.-справ.: в 2 кн. / Г. И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. Костюк Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. Костюк Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с.
5. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.
6. Костюк Г. И. Наноструктуры и нанопокрывтия: перспективы и реальность: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
7. Костюк Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
8. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
9. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.
10. Костюк Г. И. Физико-технические основы роботизированного производства: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.
11. Гречихин Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
12. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
13. Гусев А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства / А. И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.
14. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
15. Решетняк, Е. Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий / Е. Н. Решетняк, А. И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.
16. Андриевский Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.
17. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала / А. А. Гончаров, П. И. Игнатенко, В. В. Петухов и др. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.

## Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur: monogr* [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.
3. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 1: *Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennyykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies]. 596 p.
5. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Reference for calculation of the main physical and technological parameters, assessing opportunities, selecting the type of technologies and equipment]. 482 p.
6. Kostyuk, G. I. *Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
7. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh*  
*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*
8. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
9. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, AINU, 2003. 412 p.
10. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva* [Physical and technical bases of robotized production] – Kharkov, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2006. – 614 p.
11. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologiy* [The physics of nanoparticles and nanotechnology] – Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
12. Aksenov, I. I. *Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy* [Vacuum arc erosion plasma sources] – Kharkiv, NII «KHFTI», 2005. 211 p.
13. Gusev, A. I. *Nanokristallicheskiye materialy: metody polucheniya i svoystva* [Nanocrystalline materials: methods and properties] – Ekaterinburg, Publishing House of the Russian Academy of Sciences, Ural Division, 1998. 302 p.
14. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology] – Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.
15. Reshetnyak, E. N., Strel'nitskiy A. I. [Synthesis of hardening of nanostructured coatings] – [Problems of Atomic Science and Technology]. – 2008. – № 2. – p.p. 119 – 130.
16. Andriyevskiy, R. A. *Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy* [Nanomaterials: concept and modern problems] *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2003. – Т. 91, № 1. – p.p. 50 – 56.
17. Goncharov A. A., Ignatenko P. I., Petukhov V. V. et al. *Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnyykh plenok boridov tantala* [The composition, structure and properties of nanostructured films of tantalum borides]. *ZhTF*. – 2006. – Т. 76, no. 10. – p.p. 82 – 87.

Поступила (received) 17.11.16

**Особливості утворення наноструктур на одно-, дво- і трьохкарбідних твердих сплавах при дії лазерного випромінювання / Г. І. Костюк, О. О. Бруяка, О. О. Воляк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 81–94. – Библиогр.: 17 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Особенности образования наноструктур на одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавах при действии лазерного излучения / Г. И. Костюк, О. О. Бруяка, Е. А. Воляк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 81–94. – Библиогр.: 17 назв. – ISSN 2079-004X.**

**The peculiarities of nanostructures on one-, two- and trehkarbidnyh solid alloys under laser radiation / G. I. Kostyuk, O. O. Bruyaka, Ye. A. Volyak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.81–94. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-004X**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Костюк Геннадій Ігорович** – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Костюк Геннадій Ігорович** – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Kostyuk Gennadiy Igorevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovskiy, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Бруяка Ольга Олегівна** – к. т. н., доц., доц. Нац. авіац. ун-ту, м. Київ, тел.: (057)-788-42-06

**Бруяка Ольга Олегівна** – к. т. н., доц., доц. Нац. авіац. ун-та, г. Київ, тел.: (057)-788-42-06

**Bruiaka Olga Olehovna** – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, National Aerospace University, Kiev, tel.: (057)-788-42-06;

**Воляк Елена Александрівна** – к. т. н, Нац. аерокосм. ун-ту «ХАІ», м. Харків, тел.: (057)-788-42-06;

**Воляк Елена Александрівна** – к. т. н, Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», г. Харьков, тел.: (057)-788-42-06;

**Voliak Elena Aleksandrovna** – Candidate of Technical Sciences, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06