

УДК 621.923+629.7
DOI: 10.12737/23204

А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев,
А.А. Жирков, О.Н. Федонин,
С.О. Федонина, А.В. Хандожко

A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov,
A.A. Zhirkov, O.N. Fedonin,
S.O. Fedonina and A.V. Handozhko

ВОЗМОЖНОСТИ АДДИТИВНО-СУБТРАКТИВНО- УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

POTENTIALITIES IN ADDITIVE-SUBTRACTIVE- STRENGTHENING TECHNIQUES

Аннотация

Точное получение формы - это важнейшая, но далеко не единственная задача, которая решается при производстве деталей. Не менее важными являются также такие свойства, как: упругость и пластичность, прочность и износостойкость и др. Известно, что высокотемпературное воздействие на материал заготовки, которым сопровождается любой из известных процессов аддитивной обработки, негативно сказывается на вышеперечисленных свойствах. Важнейшей задачей аддитивных технологий является обеспечение качественной структуры материала и высоких эксплуатационных свойств получаемой детали при многократном увеличении производительности.

Целью проведенных теоретических и практических исследований является разработка технологии, в которой к процессам аддитивной и субтрактивной обработки добавляется процесс упрочнения ударной волной деформации, что позволяет структурировать, уплотнить, упрочнить материал выращенного слоя, сформировать вместо растягивающих остаточных напряжений термической природы сжимающие. Выращивание детали производится дуговым наплавлением материала из проволоки. Такой подход обеспечивает на порядок более высокую производительность, но имеет издержки в виде дефектов структуры, высокой пористости и меньшей точности по сравнению с порошковыми аддитивными технологиями. Указанные недостатки компенсируются упрочняющей и механической обработкой в процессе получения детали.

Методы исследования - сравнительный анализ структуры железоуглеродистого материала, полученного аддитивно-субтрактивной технологией и аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологией.

Результаты и выводы. В упрочненном материале, в отличие от неупрочненного, практически отсутствуют скрытые полости. Размеры фазовых элементов феррита и перлита в материале, полученном по технологии с упрочнением, снижается более чем в пять раз. Твердость материала, выращенного с упрочнением, более чем в два раза превышает твердость материала, полученного без упрочнения.

Abstract

The accurate shape obtaining is the most significant, but far from being the only problem which is solved at parts production. Not less important are also such properties as elasticity, plasticity, strength and durability and so on. It is well-known that high-temperature influence upon billet material which follows any of known processes of additive processing adversely affects the above-mentioned properties. The most significant task of additive techniques is ensuring material qualitative structure and high operating properties in a part manufactured at multiple increase of productivity.

The purpose of theoretical and practical researches carried out consists in the development of the technology in which to the processes of additive and subtractive treatment there is added a process of hardening with shock wave deformation that allows structuring, strengthening, compacting the material of a layer grown forming compressive stresses instead of tensile residual stresses of thermal origin. The growth of a part is carried out by means of arc deposition with wire material. Such an approach ensures productivity by an order higher, but has such drawbacks as defects of structure, considerable porosity and low accuracy in comparison with powder additive techniques. The drawbacks mentioned are compensated by strengthening and machining in the course of product manufacturing.

The research methods - a comparative analysis of the structure of iron-carbon material manufactured with the use of additive-subtractive techniques and additive-subtractive strengthening techniques.

Results and conclusions. In strengthened material, in contrast to non-strengthened one there are no practically hidden cavities. The dimensions of phase elements of ferrite and pearlite in material manufactured according to the technology with strengthening decrease by more than five times. Hardness of material grown with strengthening exceeds more than twice hardness of material manufactured without strengthening.

Ключевые слова: аддитивная технология, субтрактивная обработка, упрочнение, твердость, упрочненный материал.

Key words: additive techniques, subtractive treatment, hardening, hardness, strengthened material.

1. Введение

Аддитивные технологии уже приобрели статус стратегически важных, приоритетных технологий машиностроения. Они позволяют значительно ускорить опытно-конструкторские работы, а также работы по подготовке производства и уже активно применяются для производства готовой продукции. Наиболее перспективным направлением развития аддитивных технологий является возможность получения готовых деталей или полуфабрикатов из металлических материалов с минимальным припуском для заключительной чистовой механической обработки.

Точное получение формы - это важнейшая, но далеко не единственная задача, которая решается при производстве деталей. Не менее важными являются также такие свойства, как: упругость и пластичность, прочность и износостойкость и др. Известно, что высокотемпературное воздействие на материал заготовки, которым сопровождается любой из известных процессов аддитивной обработки, негативно сказывается на вышеперечисленных свойствах. Причем с ростом производительности резко увеличивается количество дефектов структуры, растет пористость, снижаются механические и эксплуатационные свойства. Важнейшей задачей аддитивных технологий является обеспечение качественной структуры материала и высоких эксплуатационных свойств получаемой детали при многократном увеличении производительности.

В настоящее время наиболее распространена технология выращивания металлических деталей из металлопорошковых композиций под высокотемпературным воздействием. Детали формируются путем последовательной послойной наплавки или послойного спекания металлического порошка. В качестве теплового источника, как правило, используется лазер. Производительность такой технологии составляет 5...35 см³/час.

Значительно более высокой производительностью отличается технология выращивания металлических деталей методом послойного наваривания материала, где модельным материалом является металлический пруток или проволока. В виде проволоки доступен значительно более широкий диапазон материалов: никелевые сплавы, нержавеющие и инструментальные стали, сплавы *CoCr* и многие другие. В отличие от порошковых

1. Introduction

Additive techniques have already obtained the status of strategically significant, priority engineering techniques. They allow accelerating considerably development activities and also the works on preproduction and used actively in produce manufacturing. The most promising direction in the development of additive techniques is a possibility of obtaining ready-made produce or semi-prepared articles made of metal with minimum allowance for final finishing machining.

The accurate form obtaining is the most significant, but far to be the only problem which is solved at produce manufacture. Not less important are such properties as elasticity and plasticity, strength and durability and so on. It is well-known that high-temperature influence upon billet material by which is accompanied any of known processes of additive processing adversely affects the above-mentioned properties. In which connection with the growth of productivity the number of structure defects increases sharply, porosity grows, the stress-strain and service properties fall. The most significant purpose of additive techniques consists in ensuring a material qualitative structure and high service properties of a part manufactured at multiple increase of productivity.

At present time the technology of metal parts growth from metal-powder compositions under the influence of high temperature is a widespread technique. Parts are formed by means of a successive layer welding deposition or a layer fritting. As a thermal source, as a rule is used laser. The productivity of such a technology makes 5 ... 35cm³/h.

The technology of metal parts growth by the method of layer welding deposition, where model material is a metal rod or wire differs with considerably higher productivity. The wider range of materials in the form of wire is accessible, in particular, nickel alloys, stainless steel, tool steel, *CoCr* alloys and many others. Unlike powder materials for additive techniques, cost of wire is 9-10 times less, and equipment productivity using wire as model material is three times higher. Besides,

материалов для аддитивных технологий, стоимость проволоки в 9-10 раз ниже, а производительность оборудования, использующего проволоку в качестве модельного материала, – в 3 раза выше. Кроме этого, технология позволяет выращивать крупные детали до нескольких метров, что невозможно или чрезмерно дорого обеспечить другими аддитивными технологиями вследствие ограниченных размеров рабочей зоны оборудования. Источником тепловой энергии при послойном наваривании материала является лазер или плазмотрон, ионизирующий инертный газ и генерирующий поток плазмы, температура которой достигает 5000-30000 К. Достоинством технологии на базе плазматрона является относительно невысокая стоимость по сравнению с лазерными системами.

Недостатками технологии послойного наваривания являются низкая точность размеров, дефекты структуры и высокая пористость получаемой детали, а также остаточные растягивающие напряжения термической природы.

Проблема повышения точности формообразования при выращивании и получения необходимых размеров решается применением механической обработки синтезированных поверхностей – субтрактивной обработки. Наиболее передовым решением является возможность механической обработки в процессе аддитивного выращивания, между переходами послойного синтеза, а не механическая обработка готовой детали. Это позволяет обеспечить механической обработкой высокую точность труднодоступных поверхностей, доступ к которым при обработке готовой детали невозможен или проблематичен. Установки для реализации аддитивно-субтрактивных технологий состоят из двух модулей. Для послойного синтеза используется аддитивный модуль, для выполнения коррекции формы детали механической обработкой резанием – субтрактивный. Такое сочетание оптимально для решения задач формообразования.

Для снижения дефектов структуры и высокой пористости и повышения качественных характеристик материала, создания сжимающих остаточных напряжений, благоприятно влияющих при работе деталей в условиях действия усталостных нагрузок, предлагается в процессе выращивания детали кроме снятия стружки в процессе механической обработки резанием применять деформационную упрочняющую обработку.

the technology allows growing large parts up to some meters, that is impossible or too expensive to ensure with the aid other additive techniques because of the limited dimensions of equipment working area. The source of thermal energy at layer welding-on of material is laser or a plasmatron ionizing rare gas and generated a plasma flow the temperature of which reaches 5000-30000 K. The advantage of the technology based on a plasmatron consists in a relatively small cost in comparison with laser systems.

The disadvantage of the layer welding-on technology consists in low dimensions accuracy and high porosity in products manufactured and also residual tensile stresses of thermal origin.

The problem of shaping accuracy increase at growing and obtaining essential dimensions in production is solved with the use of synthetic surface machining – subtractive processing.

The most progressive solution is a possibility of machining in the course of additive growing, between transitions of a layer synthesis, but not the machining of a completed part. It allows ensuring the high accuracy in hard-to-reach areas by means of machining the access to which at complete part machining either impossible or problematic. The plants for the realization of additive-subtractive technologies consist of two modules. For the layer synthesis is used an additive module and for the correction of a part form by means of cutting – a subtractive one. Such a combination is optimum for the solution of shaping problems.

To decrease structure defects and high porosity and increase quality characteristics of material and also to create compressive residual stresses having a favorable influence upon parts operating under conditions of fatigue loads it is offered to use strain strengthening in the course of a part growth besides chips removal while cutting.

2. Результаты и обсуждение

Процесс выращивания по технологии послойного наваривания основан на сварке наращиваемых слоев, поэтому получаемому материалу присущи соответствующие сварке дефекты. Одним из эффективных способов упрочнения сварных швов является поверхностное пластическое деформирование (ППД), которое позволяет значительно уплотнить материал и снизить пористость, получить более прочную и твердую структуру, создать в упрочненном поверхностном слое сжимающие остаточные напряжения. Упрочнение ППД, как правило, не требует высоких энергозатрат и сложного технологического оборудования.

В настоящее время для упрочнения сварных швов успешно применяются такие способы ППД, как ультразвуковая обработка и обработка вращающимися металлическими щетками, которые позволяют упрочнять структуру материала на глубину до 0,1-0,3 мм. Другие известные способы ППД, которые потенциально могут использоваться для упрочнения сварных швов, - дробеструйная обработка и накатывание - позволяют обеспечивать глубину упрочнения до 0,5-1,5 мм. Однако в процессе послойного синтеза навариванием синтезированный слой подвергается разрушающему высокотемпературному воздействию при наплавке следующего слоя. Для успешного решения проблемы необходима возможность управления параметрами деформационного упрочнения в широком диапазоне. Эта возможность в полной мере свойственна способу упрочнения волной деформации.

Особенность упрочнения ударными волнами деформации заключается в том, что в ударной системе «боек - волновод» генерируются плоские акустические волны, которые характеризуются законом изменения сил (амплитудой волны деформации) во времени, временем действия сил (длительности волны деформации) и энергией волны деформации. Эти характеристики зависят от геометрии соударяющихся бойка и волновода, свойств их материалов и скорости соударения. Период волны - ударный импульс, поступающий в очаг деформации, т.е. область контакта инструмента с упрочняемым материалом. Форма импульса определяет эффективность динамического нагружения. Необходимым условием упрочнения волной деформации является статическое поджатие волновода с инструментом к обрабатываемой поверхности, обеспечивающее надежный пост-

2. Results and Discussion

The process of growing on the technology of layer welding-on is based on layer grown welding that is why corresponding defects are peculiar to the material obtained. One of the effective methods of weld seam strengthening is surface plastic deformation (SPD) which allows packing material considerably and reducing porosity, obtaining stronger and solid structure, creating compression residual stresses in the strengthened surface layer. The SPD strengthening, as a rule, does not require high power consumption and complicated manufacturing equipment.

At present time for weld seam strengthening there are successfully used such methods of SPD as ultra-sonic processing and working with metal rotating brushes which allow strengthening material structure for the depth up to 0.1-0.3 mm. Other well-known SPD methods which could be potentially used for weld seam strengthening, shot blasting and rolling – allow ensuring the strengthening depth up to 0.5-1.5 mm. But during the layer synthesis with welding-on the synthesized layer is subjected to a weakening high-temperature effect at the welding deposition of the following layer. For the successful solution of this problem it is necessary to have a possibility of the parameter control in the strain strengthening in a wide range. This possibility is peculiar to the method of wave strain strengthening in full measure.

The peculiarity of strengthening with shock wave strain consists in that in the shock system “head-waveguide” the flat acoustic waves are generated which are characterized by the law of forces variation (by amplitude of deformation) wave in time, by the period of forces action (duration of deformation wave) and by energy of deformation wave. These characteristics depend upon the geometry of colliding a head and a waveguide, properties of their material and concussion velocity. A wave period is a shock pulse coming to the center of deformation, that is, to the area of contact of a tool and strengthening material. A pulse form defines effectiveness of dynamic loading. As an essential condition for strengthening with a deformation wave is a static waveguide compression with a tool to

янный контакт и рекуперацию отраженных волн деформации. При упрочнении форма ударных импульсов максимально адаптируется к свойствам материала и условиям нагружения, что увеличивает коэффициент полезного действия и расширяет технологические возможности процесса, позволяя создавать глубокий упрочненный слой [1-6].

Энергия ударных волн, расходуемая на пластическую деформацию упрочняемого материала, определяется конструктивно-технологическими параметрами – формой и размерами бойка и волновода и технологическими параметрами – кинетической энергией удара и предварительным статическим поджатием инструмента к упрочняемой поверхности. В результате изменения указанных параметров осуществляются микроперемещения инструмента, формируется пластический отпечаток определенных размеров – единичный след инструмента. Форма и размеры отпечатка во многом определяют закономерность изменения свойств материала по глубине поверхностного слоя. Размеры единичных отпечатков, их относительное смещение, регулируемое частотой ударов и подачей инструмента относительно заготовки, определяют равномерность упрочнения.

Волновое деформационное упрочнение имеет наиболее широкие возможности варьирования упрочненной структурой металла. Глубина модифицированного слоя упрочненного материала может достигать 10 мм, появляется возможность формирования гетерогенно упрочненной структуры [7], для которой характерно чередование твердых и вязкопластичных областей.

Гетерогенно модифицированная поверхность сплошного материала обладает более высокой несущей способностью. Вязкий материал тормозит развитие хрупкой микротрещины, сформировавшейся в несущей твердой составляющей, хорошо сопротивляющейся циклическим нагрузкам. Проведенные исследования гетерогенно упрочненной структуры, полученной ударными волнами деформации, установили возможность повышения контактной выносливости материала до 7 раз [8, 9]. Исследования структуры металлических образцов, упрочненных волнами деформации, выявили наличие наноструктурных зон, аналогичных полученным интенсивной пластической деформацией [10], размеры которых изменяются от 30 до 90 нм, что способствует одновременно существенному повышению твердости

the surface worked ensuring a reliable constant contact and recuperation of reflected deformation waves. During strengthening a shock pulse form is adapted maximum to the properties of material and conditions of loading that increases the efficiency and widens technological capabilities of the process allowing the creation of a deep-strengthened layer [1-6].

Energy of shock waves spent for plastic deformation of material to be strengthened is defined by design-technological parameters: by a form and dimensions of the head and waveguide and technological parameters: by kinetic energy of a blow and preliminary static compression of a tool to the surface under strengthening. As a result of mentioned parameter changes are carried out tool microdisplacements and a plastic mark of certain dimensions is formed – a single trace of a tool. The dimensions of single traces, their relative displacement controlled by a blow frequency and tool advance with regard to a billet define a strengthening evenness.

A wave strain strengthening has the widest possibilities for variation with metal strengthened structure. The depth of a modified layer in strengthened material can reach 10 mm, a possibility for the formation of a heterogeneously strengthened structure appears [7] for which the interchange of solid and viscoplastic areas is characteristic для которой характерно чередование твердых и вязкопластичных областей.

A heterogeneously modified surface of solid material possesses a higher load-carrying ability. Sticky material suppresses the propagation of a fragile micro-crack formed in a bearing solid constituent resisting well to cyclic loadings. The investigations carried out of a heterogeneously strengthened structure obtained by shock waves of deformation established a possibility to increase material contact endurance up to 7 times [8, 9]. The investigations of metal sample structures strengthened with deformation waves revealed the existence of nano-structural areas similar to those obtained by intensive plastic deformation [10] the dimensions of which change within the limits of 30 to 90 nm, that promote simultaneously considerable increase of hardness (2-7 times higher than hardness of

(в 2-7 раз выше, чем твердость крупнозернистых аналогов) и сохранению высокой пластичности [11-13].

Важной особенностью способа волнового деформационного упрочнения является возможность точного регулирования энергии, сообщаемой элементарному участку упрочняемой поверхности, размеры которого могут составлять от 1-2 до 50 мм. Это позволяет упрочнять различные по форме и размерам поверхности, обеспечивая требуемую глубину, степень и равномерность упрочнения.

Таким образом, предлагаемая аддитивно-субтрактивно-упрочняющая технология состоит из следующих переходов (рис. 1):

- послойный синтез материала навариванием (один или несколько слоев);

- волновое деформационное упрочнение синтезированных слоев;

- механическая обработка наплавленной и, если необходимо, упрочненной поверхности с целью удаления дефектного слоя и обеспечения высокой точности и низкой шероховатости ответственных поверхностей.

Проведены сравнительные исследования структуры железоуглеродистого материала, полученного аддитивно-субтрактивной технологией и аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологией. Послойный синтез выполнялся способом дугового наваривания материала (проволока ER70S-6: C 0,06-0,15; Mn 1,40-1,85; Si 1,50-1,85; $S \leq 0,035$; $P \leq 0,025$; $Cu \leq 0,50$).

Установлено, что в упрочненном материале, в отличие от неупрочненного, практически отсутствуют поры и скрытые полости. Размеры фазовых элементов феррита и перлита в материале, полученном по технологии с упрочнением, более чем в пять раз меньше. Микротвердость материала, выращенного с упрочнением, более чем в два раза превышает микротвердость материала, полученного без упрочнения.

3. Заключение

Процесс выращивания детали дуговым послойным наплавлением материала из проволоки по сравнению с порошковыми аддитивными технологиями экономически многократно более выгоден и обеспечивает более высокую производительность. Недостатки такой технологии в виде дефектов структуры, высокой пористости и

coarse-grained analogues) and conservation of high plasticity [11-13].

A significant peculiarity of the method of wave strain strengthening is a possibility of an energy accurate control imparted to an elementary area of the surface under strengthening the dimensions of which can make from 1-2 mm to 50 mm. It allows strengthening surfaces various in a form and dimensions ensuring the required depth, degree and evenness of strengthening.

In such a way, the offered additive-subtractive strengthening technology consists of the following transitions (Fig. 1):

- The layer synthesis of material by welding-on (one or some layers);

- The wave strain strengthening of synthesized layers;

- The machining of built-up and, if necessary, strengthened surface with the purpose defective layer elimination and for the ensuring of high accuracy and low roughness of critical surfaces.

There are carried out comparative investigations of the structure of iron-carbon material manufactured by means of the additive-subtractive technology and additive-subtractive strengthening techniques. The layer synthesis was carried out with the aid of the method of material arc welding-on (wire ER70S-6: C 0.06-0.15 Mn 1.40-1.85 Si 1.50-1.85 $S \leq 0.035$ $P \leq 0.025$ $Cu \leq 0.50$).

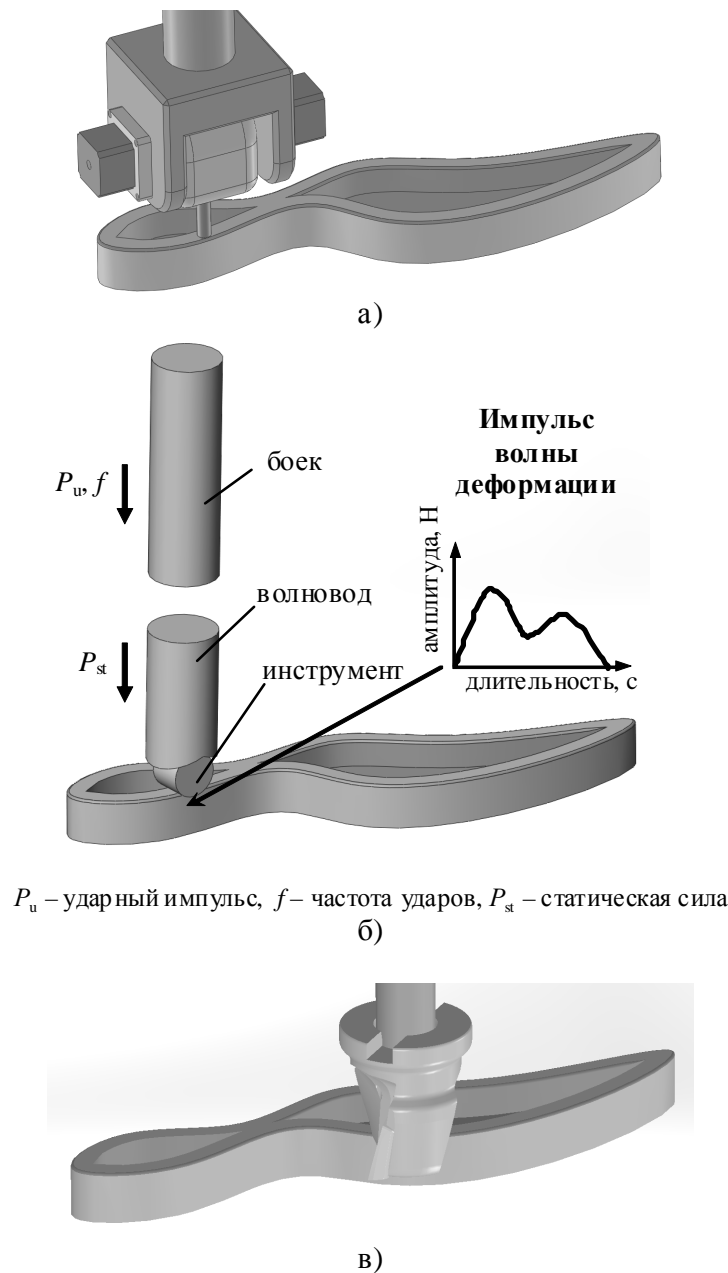
It is established that in strengthened material in contrast to non-strengthened one there are no practically pores and hidden cavities. The dimensions of phase elements of ferrite and pearlite in material obtained according to the technology with strengthening are more than five times less. Micro-hardness of material grown with strengthening more than twice exceeds micro-hardness of material obtained without strengthening.

3. Conclusion

The process of a part growing by means of arc layer fusing with the use of wire material in comparison with powder additive techniques is economically multiply sound and ensures higher productivity. The drawbacks of this technology such as structure defects, high porosity and lower accuracy are compensated by

меньшей точности компенсируются упрочняющей и механической обработкой в процессе получения детали.

strengthening and machining in the course of product manufacturing.



P_u – ударный импульс, f – частота ударов, P_{st} – статическая сила

б)

в)

Рис. 1. Этапы аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии:

а - послойный синтез материала;

б - волновое деформационное упрочнение;

в - механическая обработка наплавленной и, если необходимо, упрочненной поверхности

Fig.1. Stages of the additive-subtractive strengthening techniques:

a – The layer synthesis of material.

b – The wave strain strengthening.

c – The machining of a built-up surface and, if necessary, strengthened one.

Предлагаемая технология упрочнения ударной волной деформации позволяет структурировать, уплотнить, упрочнить материал выращенного слоя, сформировать вместо растягивающих остаточных напряжений термической природы

The offered strengthening technology with a shock wave of deformation allows structuring, compacting material of a layer grown, and forming the compressing residual stresses instead of tensile residual ones. A possibility

сжимающие. Появляется возможность создания гетерогенно упрочненной структуры выращенного металлического материала, сочетающей одновременно твердые и пластичные участки, обладающей высокой эффективностью при эксплуатации в условиях действия усталостных нагрузок.

Предлагаемое сочетание в одном технологическом оборудовании аддитивного модуля, отвечающего за выращивание детали, субтрактивного модуля, обеспечивающего точность размеров и взаимного расположения ответственных поверхностей за счет удаления стружки, и упрочняющего модуля, позволяющего структурировать, уплотнить, упрочнить и снять напряжения в выращенном слое за счет волнового деформационного воздействия, имеет самые широкие перспективы.

Подтверждение

Исследование была проведено при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00112.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киричек, А.В. Способы динамического упрочнения поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Кузнечно-штамповочное производство (Обработка металлов давлением). - 2001. - №7. - С. 28-32.
2. Киричек, А.В. Ударное устройство для статико-импульсной деформационной обработки / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Кузнечно-штамповочное производство (Обработка металлов давлением). - 2002. - № 10. - С. 35-40.
3. Kirichek, A. V. Deformation Wave Hardening of Metallic Materials / A. V. Kirichek, D. L. Soloviev, A. Yu. Altuhov // Journal of Nano and Electronic Physics. - 2014. - №6(3). - 03069(4pp).
4. Киричек, А.В. Влияние режимов статико-импульсной обработки на равномерность упрочнения поверхностного слоя / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Кузнечно-штамповочное производство (Обработка металлов давлением). - 2004. - №2. - С.13-17.
5. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. - М.: Машиностроение, 2004. - 288 с.
6. Механика нагружения поверхности волной деформации / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов, Д.Л. Соловьев. - М.: Машиностроение-1, 2005. - 149 с.
7. Kirichek, A.V. Creating heterogeneous surface structures by static-pulsed treatment / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Russian Engineering Research. - 2008. - №28(3). - С. 277-279.
8. Kirichek, A.V. Properties and Technology for Quasi-Composite Blanket Using Natural Reinforcement of the Metal

arises for the creation of a heterogeneously strengthened structure of the grown metal material combining simultaneously solid and plastic areas having high effectiveness during the operation under conditions of fatigue load effect.

The offered combination in one technological equipment an additive module responsible for a part growth, a subtractive module ensuring dimension accuracy and a mutual location of critical surfaces at the expense of chip clearance and a strengthening module allowing the structuring, compacting, strengthening and relieve the stresses in the layer grown at the expense of wave strain effect has the most extensive prospects.

Acknowledgement

The study was supported on the base of grant provided by RFBR, 14-08-00112.

REFERENCES

- [1] Kirichek A V and Solov'ev D L 2001 The methods of dynamic surface strengthening by plastic deformation *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem)* **7** 28-32
- [2] Kirichek A V, Solov'ev D L and Silant'ev S A 2002 Impact device for static-pulse deformation working *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem)* **10** 35-40
- [3] Kirichek A V, Soloviev D L and Altuhov A Yu 2014 Deformation Wave Hardening of Metallic Materials *Journal of Nano and Electronic Physics* **6(3)** 03069(4pp)
- [4] Kirichek A V, Solov'ev D L and Silant'ev S A 2004 Influence of regimes of static-pulse processing on uniformity of superficial layer hardening *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem)* **2** 13-17
- [5] Kirichek A V, Soloviyov D L and Lazutkin A G 2004 Techniques and equipment for static-pulse processing with surface plastic deformation. Technologist's Library Moskau: Mechanical Engineering pp.288
- [6] Lazutkin A G, Kirichek A V, Stepanov Yu S and Soloviyov D L. 2005 Loading Mechanics of Wave Strain Surface Moskau Mechanical Engineering-1 pp.149
- [7] Kirichek A V and Solov'ev D L 2008 Creating heterogeneous surface structures by static-pulsed treatment *Russian Engineering Research* **28(3)** 277-279
- [8] Kirichek A V and Soloviev D L 2013 Properties and Technology for Quasi-Composite Blanket Us-

- by Strain Affected Areas / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // *Journal of Nano and Electronic Physics*. - 2013. - № 5(4). - 04010(5pp).
9. Kirichek, A.V. Production of a Quasicomposite Surface Layer of a Metal Material by Shock Wave Strain Hardening / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A. Yu. Altuhov // *Journal of Nano and Electronic Physics*. - 2014. - № 6(3). - 03070(4pp).
10. Valiev, R.Z. Structure and Properties of Ultrafine-Grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation / R.Z. Valiev, A.V. Korznikov, R.R. Mulyukov // *Materials Science and Engineering*. - 1993. №168. - С. 141-148.
11. Siegel, R.W. Mechanical properties of nanophase metals / R.W. Siegel, G.E. Fougere // *Nanostructure Materials*. - 1995. - № 6. - С. 1-4.
12. Kirichek, A.V. Nanostructure Changes in Iron-Carbon Alloys as a Result of Impulse Deformation Wave Action / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // *Journal of Nano and Electronic Physics*. - 2013. - №5(4). - 04009(4pp).
13. Kirichek, A.V. Dimensional Effects in Micro- and Nanostructural Changes in Grain and Intragrained Structure of Steel 45 at Static-pulse Treatment / A.V. Kirichek, A.P. Kuzmenko, D.L. Soloviev, S.V. Barinov, A.Yu. Altukhov, S.A. Silantiev, A.N. Grechukhin, Than Myo Min, M.B. Dobromyslov // *Journal of Nano and Electronic Physics*. - 2015. - №7(4). - 04023(4pp).
- ing Natural Reinforcement of the Metal by Strain Affected Areas *Journal of Nano and Electronic Physics* **5(4)** 04010(5pp)
- [9] Kirichek A V, Soloviev D L and Altuhov A Yu 2014 Production of a Quasicomposite Surface Layer of a Metal Material by Shock Wave Strain Hardening *Journal of Nano and Electronic Physics* **6(3)** 03070(4pp)
- [10] Valiev R Z, Korznikov A V and Mulyukov R R 1993 Structure and Properties of Ultrafine-Grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation *Materials Science and Engineering* **168** 141-148
- [11] Siegel R W and Fougere G E 1995 Mechanical properties of nanophase metals *Nanostr. Mat.* **6** 1-4
- [12] Kirichek A V and Soloviev D L 2013 Nanostructure Changes in Iron-Carbon Alloys as a Result of Impulse Deformation Wave Action *Journal of Nano and Electronic Physics* **5(4)** 04009(4pp)
- [13] Kirichek A V, Kuzmenko A P, Soloviev D L, Barinov S V, Altukhov A Yu, Silantiev S A, Grechukhin A N, Than Myo Min and Dobromyslov M B 2015 Dimensional Effects in Micro- and Nanostructural Changes in Grain and Intragrained Structure of Steel 45 at Static-pulse Treatment *Journal of Nano and Electronic Physics* **7(4)** 04023(4pp)

Сведения об авторах:**Киричек Андрей Викторович**

Доктор технических наук, профессор,
Проректор по перспективному
развитию вуза
Брянский государственный
технический университет,
бульвар 50 лет Октября, 7,
Брянск, Россия,
Тел. (4832) 51-51-38
E-mail: avk@tu-bryansk.ru

Соловьёв Дмитрий Львович

Доктор технических наук, профессор
Муромский институт (филиал)
Владимирский государственный
университет,
Орловская ул., 25,
Муром, Россия
Тел.: (920) 900-46-42
E-mail: murstin@yandex.ru

Жирков Александр Александрович

Кандидат технических наук
Брянский государственный
технический университет,
бульвар 50 лет Октября, 7,
Брянск, Россия,
Тел. (4832) 51-51-38
E-mail: ms-portal@rambler.ru

Федонин Олег Николаевич

Доктор технических наук, профессор,

Authors' Data:**Andrey Viktorovich Kirichek**

D. Eng., Prof.,
Pro-rector for college promising development
Bryansk State
Technical University,
7, 50 years of Oktyabrya Boulevard,
Bryansk, Russia
Phone: (4832) 51-51-38
E-mail: avk@tu-bryansk.ru

Dmitry Lvovich Soloviyov

D. Eng., Prof.,
Murom Institute (Branch)
of Vladimir State
University,
23, Orlovskaya Str,
Murom, Russia
Phone: (920) 900-46-42
E-mail: murstin@yandex.ru

Alexander Alexandrovich Zhirkov

Can. Eng.,
Bryansk State
Technical University,
7, 50 years of Oktyabrya Boulevard,
Bryansk, Russia
Phone: (4832) 51-51-38
E-mail: ms-portal@rambler.ru

Oleg Nikolayevich Fedonin

Rector

Ректор
Брянский государственный
технический университет,
бульвар 50 лет Октября, 7,
Брянск, Россия,
Тел. (4832) 56-09-05
E-mail: rector@tu-bryansk.ru

Федонина Светлана Олеговна

Магистрант
Брянский государственный
технический университет,
бульвар 50 лет Октября, 7,
Брянск, Россия,
Тел. (4832) 51-51-38
E-mail: fedonina.sv2015@gmail.com

Хандожко Александр Владимирович

Доктор технических наук, профессор,
Заведующий кафедрой «Металлорежущие
станки и инструменты»
Брянский государственный
технический университет,
бульвар 50 лет Октября, 7,
Брянск, Россия,
Тел. (4832) 58-82-89
E-mail: chandosh@yandex.ru

D.Eng., Prof.
Bryansk State Technical University
7, 50 years of Ocyabrya Boulevard,
Bryansk, Russia,
Phone: (4832) 56-09-05
E-mail: rector@tu-bryansk.ru

Svetlana Olegovna Fedonina

Master student
Bryansk State
Technical University,
7, 50 years of Oktyabrya Boulevard,
Bryansk, Russia
Phone: (4832) 51-51-38
E-mail: fedonina.sv2015@gmail.com

Alexander Vladimirovich Khandozhko

D. Eng., Prof.,
Head of the Dep. "Machine-tools & Tools"
Bryansk State Technical University,
7, 50 years of Ocyabrya Boulevard,
Bryansk, Russia,
Phone: (4832) 58-82-89
E-mail: chandosh@yandex.ru