

УДК 621.9+621.431.75

АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ШТАМПОВКИ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ВЫДАВЛИВАНИЯ

© 2012 В. А. Костышев, М. С. Питюгов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье проведён анализ напряжённого состояния процесса высокоскоростной штамповки методом выдавливания. Подробно анализируются факторы, влияющие на напряжённое состояние на всех стадиях формообразования. Рассматривается влияние сил инерции на силовые параметры выдавливания. Приводятся необходимые зависимости для определения энергосиловых условий формоизменения. Проводится анализ моделирования процесса высокоскоростного выдавливания лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД).

Высокоскоростная штамповка, напряжённое состояние, энергосиловые условия, моделирование, лопатка, статическая и инерционная составляющие усилия.

Одним из наиболее перспективных методов изготовления лопаток является высокоскоростное выдавливание [1].

Энергосиловые условия выдавливания

Процесс высокоскоростной штамповки методом выдавливания проходит в три этапа: распрессовка (I этап) и выдавливание (II и III этапы). Проанализируем эти этапы.

Баланс сил на всех этапах описывается уравнением

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (1)$$

где Q – усилие, действующее на заготовку со стороны деформирующего инструмента; Q_1 – «статическая» составляющая усилия; Q_2 – «динамическая» составляющая усилия, образующаяся под действием сил инерции.

Учитывая только осевые компоненты и предполагая, что очаг деформации равен объёму заходного конуса матрицы и линии тока металла направлены к точке пересечения образующих матричной воронки,

определим «динамическую» составляющую усилия [1]:

$$Q_2 = \frac{rn^2}{2} l^2 F_0, \quad (2)$$

где l – коэффициент вытяжки; n – скорость деформирования; r – плотность металла заготовки; F_0 – площадь поверхности замка.

Подставив (2) в (1) и разделив обе части уравнения на F_0 , получим удельное усилие, действующее при высокоскоростной штамповке методом выдавливания:

$$P = P_1 + \frac{l^2 rn^2}{2},$$

где P – удельное усилие; P_1 – «статическая» составляющая удельного усилия.

Характеристика действующих статических усилий и напряжений

Процесс высокоскоростной штамповки методом выдавливания можно разделить на три этапа:

– начальный этап, когда происходит распрессовка заготовки и при этом резко возрастает рабочее усилие;

– основной этап установившегося течения металла, на котором происходит плавное падение усилия штамповки;

– заключительный этап, на котором заполнение сложной гравюры штампа происходит в основном за счёт инерционных сил, а усилие штамповки резко уменьшается.

Из схемы сил, действующих на штампуемый металл в процессе высокоскоростной штамповки методом выдавливания, приведённой на рис. 1, следует, что каждый бесконечно малый объём металла будет находиться в состоянии всестороннего неравномерного сжатия.

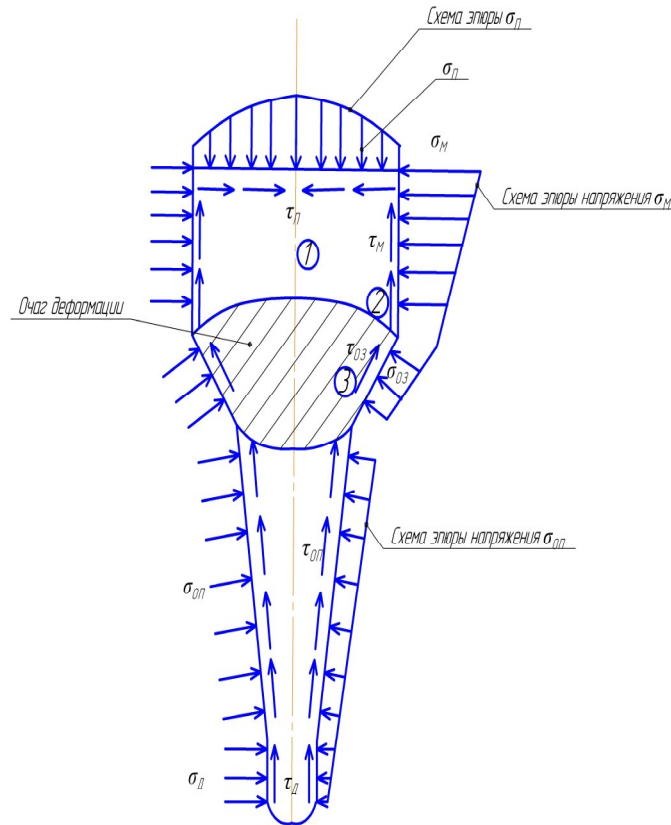


Рис. 1. Схемы сил, действующих на штампуемый металл, эпор деформации и видов напряжённого состояния:

$\sigma_n, \sigma_m, \sigma_{03}, \sigma_{оп}, \sigma_d$ – нормальные напряжения на боковых поверхностях пуансона, матрицы, обжимной части замка, пера и донной части соответственно;

$\tau_n, \tau_m, \tau_{03}, \tau_{оп}, \tau_d$ – напряжения контактного трения на пуансоне, матрице, обжимной части замка, пера и донной части, соответственно

При выдавливании на кривошипном горячештамповочном оборудовании периферийные слои металла претерпевают продольные растягивающие напряжения, которые могут превышать продольные напряжения сжатия. В этом случае изменяется напряжённое состояние металла. Всестороннее неравномерное

сжатие переходит в двустороннее сжатие и продольное растяжение.

Такое изменение вида напряжённо-деформированного состояния является крайне нежелательным, поскольку снижает технологическую пластичность металла и способствует его разрушению. Для его устранения необходимо решить

задачу по существенному снижению коэффициента контактного трения.

В условиях обработки металлов давлением преобладает, как правило, граничное трение. Это повышает неравномерность напряжённо-деформированного состояния, что способствует созданию неравномерной структуры и, как следствие, комплекса пониженных эксплуатационных механических свойств готового изделия по всему объёму.

Для устранения этого негативного фактора необходимо подобрать такой вид смазочного покрытия, который позволил бы приблизиться к состоянию жидкостно-граничного трения. При таком виде трения между трущимися поверхностями находится жидкая плёнка смазки, полностью не выдавливающаяся и не теряющая свойств жидкости в процессе деформирования. Помимо этого, смазочное покрытие должно удовлетворять ряду требований:

- создавать надёжную сплошную плёнку в течение всего процесса деформирования;

- защищать заготовку от окисления и газонасыщения при нагреве и формообразовании;

- обладать хорошими теплоизоляционными свойствами, чтобы уменьшать потери теплоты при переносе заготовки из печи в штамп и при деформировании;

- не вступать в химическое взаимодействие с поверхностью заготовки и инструмента;

- легко удаляться с поверхности штамповки.

Поскольку коэффициент вытяжки при высокоскоростном выдавливании лопаток может превышать 10 единиц, применение различных видов стекло-смазок, эмалевых покрытий, графитовой суспензии и других видов смазки не оказывает существенного влияния на снижение коэффициента контактного трения и засоряет сложную гравюру штампа. Одним из наиболее эффективных способов снижения коэффициента контактного трения при высоко-

скоростном выдавливании является покрытие исходных заготовок мягкими металлами. Одним из возможных технологических решений является нанесение на титановую заготовку никеля гальваническим методом. При температуре 980°C никель с титаном будут образовывать легкоплавкую эвтектику (рис. 2).

Поскольку воздействие индуктора будет кратковременным, легкоплавкая эвтектика будет образовываться на поверхности прутка тонкой плёнкой и осуществлять роль смазки. Это значительно уменьшит коэффициент контактного трения и обеспечит ламинарное течение металла в контактной зоне: штамповая оснастка – заготовка, что позволит приблизиться к эффекту жидкостно-граничного трения, создать равномерность напряжённо-деформированного состояния по всему объёму штамповки и увеличить ресурс работы штампов.

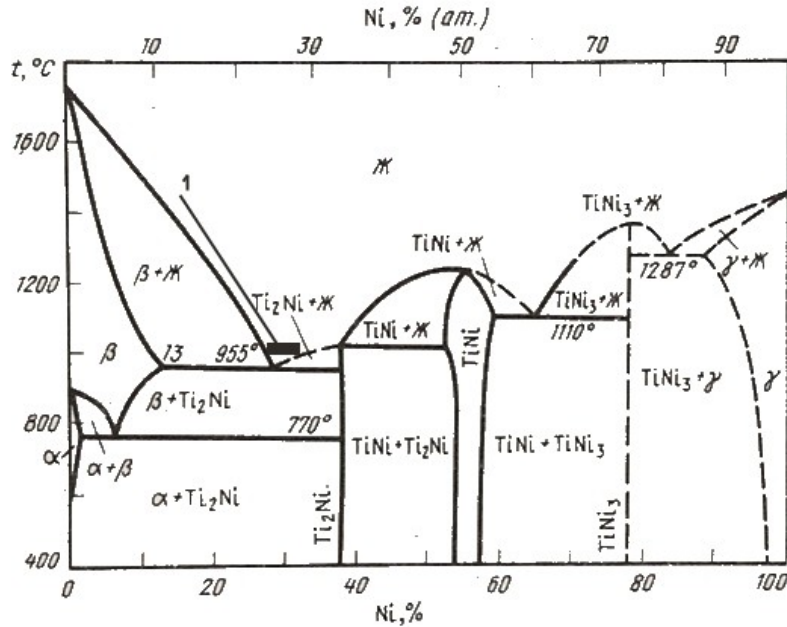
В результате индукционного нагрева поверхность заготовки будет иметь более высокую температуру по отношению к сердцевине. За время подачи заготовки из индукционной нагревательной установки в штамп высокоскоростного молота заготовка охлаждается и будет происходить выравнивание температуры по сечению. Таким образом, в момент деформирования заготовка будет иметь практически одинаковую температуру по всему объёму, а высокая скорость нагрева токами высокой частоты позволяет существенно снизить рост зерна. Это способствует созданию равномерной деформации и последующего структурно-фазового состояния и повышению свойств готового изделия.

Было проведено моделирование процесса высокоскоростной штамповки лопатки в программном продукте DEFORM-3D при коэффициентах контактного трения, равных 0,1 и 0,4. Коэффициент 0,1 соответствует выдавливанию заготовок, предварительно покрытых никелем (рис. 3, а), а

коэффициент 0,4 соответствует случаю без покрытия (рис. 3, б) – базовый вариант.

Очевидно, что лопатки, заготовки которых предварительно покрыты никелем, имеют практически однородную интенсивность напряжений по всему

объёму, в отличие от базового варианта, где наблюдается значительная неоднородность интенсивности напряжений по объёму. Полное давление деформирования при покрытии никелем снижается на 33,5% и составляет 406 МПа против 611 МПа при базовом варианте.



1 – Область эвтектики Ni – Ti

Рис. 2. Диаграмма состояния системы никель-титан (Ni - Ti)

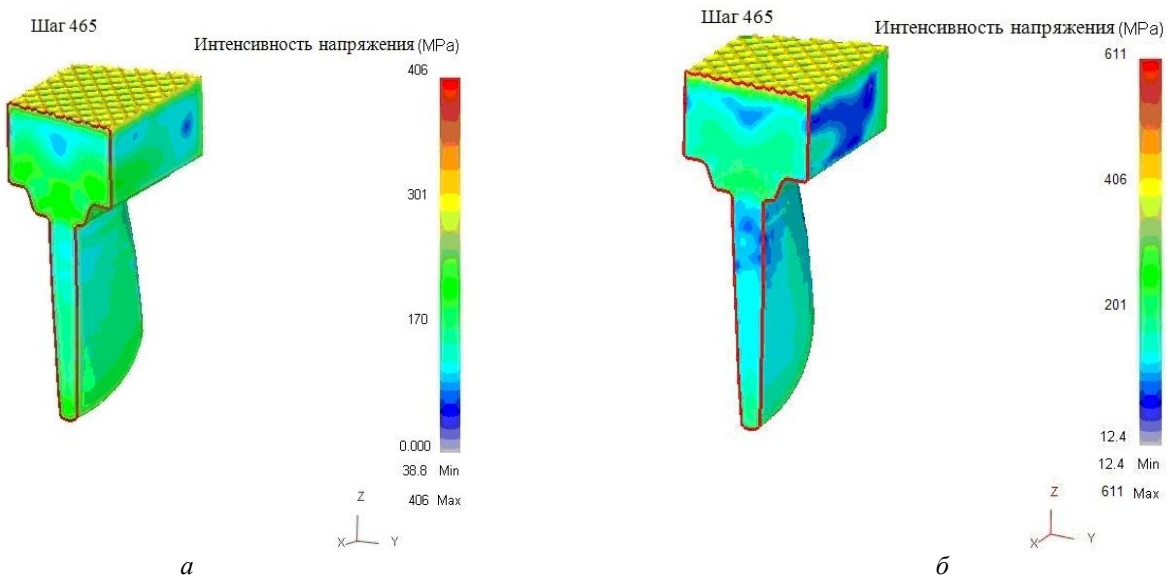


Рис. 3. Интенсивность напряжений при моделировании высокоскоростной штамповки лопатки методом выдавливания в программном продукте «DEFORM - 3D»: а - штамповка с коэффициентом контактного трения, равным 0,1; б - штамповка с коэффициентом контактного трения, равным 0,4

Существенная доля брака при производстве лопаток методом высокоскоростного выдавливания приходится на попадание в очаг деформации загрязнений с торцевой поверхности бойка и поверхности исходной заготовки вследствие турбулентного течения металла. Образующаяся при этом пресс-утяжина на подошве замка может превышать 5 мм. Одним из возможных методов устранения пресс-утяжины или снижения её до величины половины припуска на механическую обработку является повышение контактного трения на границе «боёк–заготовка». Этого можно достичь выполнением насечки на поверхности бойка. Повышенное контактное трение будет задерживать контактный слой металла и препятствовать попаданию загрязнений в очаг деформации.

Анализ этого предположения был проведён в программном продукте «DEFORM-3D». Результаты анализа показывают, что интенсивность напряжений достигает максимальных значений в контактной зоне «боёк–заготовка» и существенно превышает интенсивность напряжений во всех других зонах. В моделировании было проведено слежение за точками, находящимися на контактной поверхности «боёк–заготовка». В ходе деформирования попадания этих точек в очаг деформации зафиксировано не было. Таким образом, результаты моделирования в программном продукте «DEFORM-3D» подтверждают теоретические выводы.

Влияние сил инерции на силовые параметры выдавливания

Удельное усилие P , действующее на пуансон в процессе выдавливания, равно [1]:

$$P = \frac{e + \frac{1}{2} \rho v_0^2 \lambda^2}{1 + \frac{m}{M} \lambda^2} \alpha' \rho v^2, \quad (3)$$

где e – удельная энергия деформирования; α' – множитель инерционной составляющей удельного усилия деформирования; m – масса заготовки; M – масса бабы молота.

Из формулы (3) следует, что удельное усилие выдавливания растёт с увеличением скорости деформирования и уменьшается с ростом массы заготовки. Это объясняется тем, что при высоких скоростях деформирования изменяется схема напряжённого состояния металла. По мере увеличения скорости деформирования напряжённое состояние выдавливания переходит в напряжённое состояние волочения. Это обусловлено значительным воздействием на процесс инерционной составляющей усилия. Удельное усилие на бойке уменьшается от максимального значения в начале деформирования до минимального в конце.

Таким образом, применение вышеуказанных технологических приёмов в совокупности с высокими скоростями деформирования позволяет повысить технологическую пластичность за счёт изменения напряжённо-деформированного состояния при формоизменении. Это приводит к повышению эксплуатационной надёжности лопаток и позволяет существенно повысить комплекс механических свойств и стойкость штамповой оснастки.

Библиографический список

1. Согришин, Ю. П. Штамповка на высокоскоростных молотах [Текст] / Ю. П. Согришин, Л. Г. Гришин, В. М. Воробьев. - М.: Машиностроение, 1978. – С. 8.

ANALYSIS OF THE STRESSED STATE OF HIGH-SPEED EXTRUSION PROCESS

© 2012 V. A. Kostyshev, M. S. Pityugov

Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov
(National Research University)

The paper is devoted to the analysis of the stressed state of the process of high-speed extrusion. Factors that influence the stressed state at all stages of shape-forming are analyzed in detail. The influence of inertial forces on the force parameters of extrusion is discussed. The relationships required to determine power conditions of forming are given. Profound analysis of modeling the process of high-speed extrusion of a gas turbine engine compressor blade is carried out. The results of modeling confirm the theoretical conclusions.

High-speed stamping, stressed state, power conditions, modeling, blade, static and inertial constituents of effort.

Информация об авторах

Костышев Вячеслав Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kostyshev@ssau.ru. Область научных интересов: обработка металлов давлением, материаловедение.

Питюгов Михаил Сергеевич, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: 123_456_789_1011@mail.ru. Область научных интересов: обработка металлов давлением, материаловедение.

Kostyshev Vyacheslav Aleksandrovich, doctor of technical science, professor, the department of Plastic Working of Metals, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kostyshev@ssau.ru. Area of research: plastic working of metals, materials engineering.

Pityugov Mikhail Sergeevich, post-graduate student, the department of Plastic Working of Metals, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: 1234567891011@mail.ru. Area of research: plastic working of metals, materials engineering.