

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДИСКОВ С ЛОПАТКАМИ ЦЕЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ШТАМПОВКИ

©2010 А. И. Хаймович

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

Приводятся результаты исследования влияния различных схем формообразования на изготовление цельноштампованных дисков с лопатками.

Высокоскоростная штамповка, диски с лопатками цельной конструкции, износостойкость штамповой оснастки, энергия формообразования.

В настоящее время проектируются и изготавливаются газотурбинные двигатели (ГТД) и турбоагрегаты, оснащённые дисками с лопатками цельной конструкции, которая имеет ряд преимуществ перед составной:

- снижается вес диска с лопатками;
- повышаются газодинамические характеристики воздушного тракта;
- повышается прочность и долговечность конструкции;
- снижается разброс механических свойств материала лопаток в пределах одного диска.

Однако широкому применению дисков с лопатками цельной конструкции препятствуют ограниченные возможности и низкие технико-экономические показатели применяемых технологических процессов их изготовления. Вместе с тем существуют современные прогрессивные технологии, позволяющие решить указанную проблему. Как показано в [1], в качестве основного формообразующего процесса при изготовлении цельноштампованных дисков с лопатками может быть использована высокоскоростная штамповка. Следует отметить, что исполь-

зуемая в [1] схема формообразования обладает большой энергоёмкостью.

В статье приводятся результаты работ по исследованию влияния различных схем формообразования на изготовление цельноштампованных дисков с лопатками. Исследования проводились на моделях цельноштампованных дисков с лопатками из жаропрочной стали ЭП517Ш и титанового сплава ВТ9. Модели дисков имели геометрические размеры пера лопаток одного из промышленных изделий.

Исследовались три схемы формообразования дисков с лопатками:

1. с приложением деформирующей нагрузки по плоскому торцу диска с радиальным выдавливанием пера лопаток (рис. 1, а);
2. с центральной перемычкой фасонным пуансоном с приложением деформирующей нагрузки по всему торцу диска (рис. 1, б);
3. с локальным приложением деформирующего усилия только на торцевую поверхность обода диска с радиальным выдавливанием пера лопаток (рис 1, в).

В процессе исследования устанавливалось влияние энергосиловых параметров каждой из схем формообразования на качество оформления лопаток.

Штамповка производилась за один удар на высокоскоростном молоте ВСМ-4 в экспериментальной оснастке, нагретой до 250°C.

Исходные заготовки из жаропрочной стали ЭП517Ш нагревались в расплаве солей хлористого бария до температуры 1150±10°C с выдержкой 15 минут. Заготовки из титанового сплава BT9 нагревались токами высокой частоты в индукторе до температуры 1030±15°C. Технологическую смазку В1 ОСТ 6.08-429-74 наносили равномерным тонким слоем по всей поверхности гравюры вставок перед каждой штам-

повкой. Энергосиловые параметры штамповки определялись экспериментально по давлению азота в силовом цилиндре молота.

Энергосиловые параметры формообразования реальных цельноштампованных дисков с лопатками определялись численными методами.

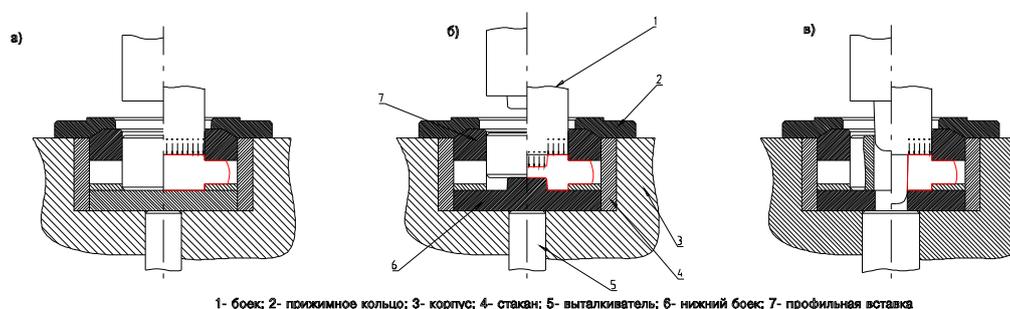


Рис. 1. Схемы формообразования цельноштампованных дисков с лопатками

Аналитически верхняя оценка энергии деформирования получена исходя из экстремальных принципов механики сплошных сред на основе кинематически допустимого поля скоростей течения металла.

Мощность формообразования определялась аддитивно – как сумма мощностей пластического формообразования по характерным областям диска с лопатками и мощности сил трения по границам между областями.

В зависимости от типа диска – с центральной перемычкой или без неё – очаг пластической деформации (ОПД) делится на три области (центральную, область обода диска и область пера лопатки). В части области обода диска наблюдается сложное трёхмерное пластическое течение, и поэтому эта зона до-

полнительно разделена на несколько блоков с жёсткими криволинейными границами (рис. 2, 3).

Для области обода диска суммарная мощность $P_{\Sigma}(n)$, затрачиваемая на формообразование обода диска, определялась по формуле

$$P_{\Sigma}(n) = (P_{\Sigma} + P_{1-2-5-6} + P_{2-6-4} + P_{2-6-12}) \times n_l, \quad (1)$$

где

P_{Σ} – диссипация мощности пластической деформации в объёме,

$P_{1-2-5-6}, P_{2-6-4}, P_{2-6-12}$ – мощности сдвига по соответствующим границам раздела между областями,

n_l – количество лопаток в диске.

Принятое поле скоростей течения металла является функцией формы границы в виде кривой $F(r,z)=0$, ограничивающей ОПД в обode диска (рис. 2, 3):

$$F(r, z) = 2r_1 \frac{z - z_3}{H_0} \left(\left(\frac{z}{z_3} \right)^{n-1} - \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{z}{z_2} \right)^{n-1} \right) - r = 0. \quad (2)$$

Здесь n – параметр формы кривой $F(r, z)=0$, который определяется исходя из принципа минимума энергии пластической деформации.

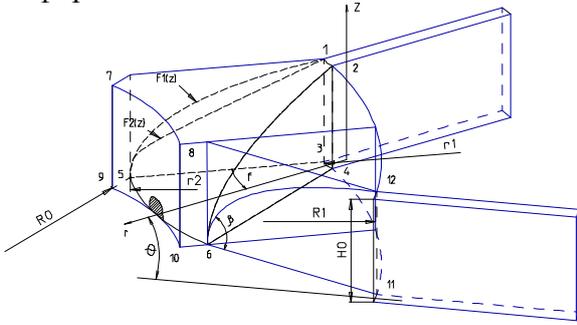


Рис. 2. Схема очага пластической деформации в ободке диска

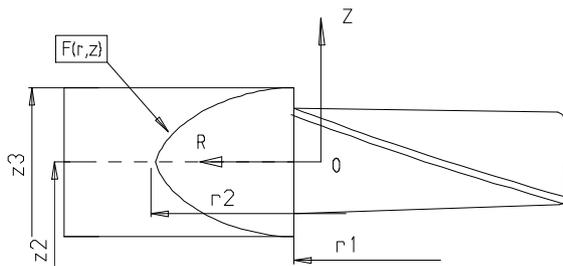


Рис. 3. Расположение пластической зоны очага деформации в продольном сечении диска

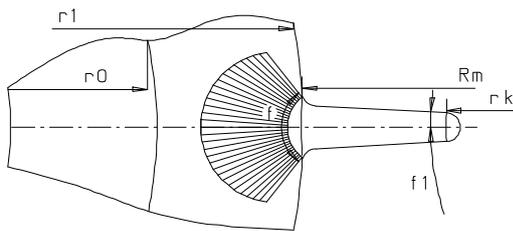


Рис. 4. Принятая геометрия линий тока в меридиональном сечении диска с лопатками

С использованием кусочно-линейной аппроксимации кривой $F(r, z)=0$ на j частей получено выражение для расчёта удельной мощности пластической деформации \bar{P}_Σ в объёме обода диска:

$$\bar{P}_\Sigma = \frac{P_\Sigma}{\Sigma_s V_0} = \frac{4}{\sqrt{3}} k_v \times \sum_{j=0}^{N-2} A(n)_j \times \left[\begin{aligned} & \left(z_{j+1} + C(n)_j \right) \times \left(\ln \left(\frac{r_{j+1}}{r_1} \right) - 1 \right) - \\ & \left(z_j + C(n)_j \right) \times \left(\ln \left(\frac{r_j}{r_1} \right) - 1 \right) \end{aligned} \right], \quad (3)$$

где

$$A(n)_j = \sqrt{4r_1^2 \times \left(\frac{z_3}{z_j} \right)^{2(n-1)} + \left(r_1 \left(\frac{z_3}{z_j} \right)^{n-1} \frac{r_{j+1}}{z_j} + \frac{d_j}{2} \right)^2},$$

$$k_v = (2 - n) \times \frac{1 - \frac{z_2}{z_3}}{\left(\frac{z_3}{z_2} \right)^{n-2}},$$

σ_s – предел текучести материала,
 V_0 – объём локального ОПД.

Удельные мощности относительного скольжения \bar{P}_{2-6-4} по плоскости 2-6-4, сил трения \bar{P}_{2-6-12} по поверхности скольжения 2-6-12, относительного сдвига $\bar{P}_{1-2-5-6}$ по поверхности 1-2-5-6 рассчитывались по зависимостям

$$\bar{P}_{2-6-4} = \frac{P_{2-6-4}}{\Sigma_s V_0} = \frac{4}{\sqrt{3}} k_v \times \left[\begin{aligned} & (n-1)R_1 \times \\ & \left[\left(\frac{z_3}{z_j} \right)^{n-1} \times R_j \left(\frac{z_{j+1}}{z_j} - 1 \right) \right] + \\ & \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left[\left(2d + R_1 \left(\frac{z_3}{z_j} \right)^{n-1} \right) \ln \left(\frac{R_{j+1}}{R_j} \right) (z_{j+1} - z_j) \right] \end{aligned} \right]; \quad (4)$$

$$\bar{P}_{2-6-12} = \frac{P_{2-6-12}}{\Sigma_s V_0} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{H_0^2}{0} \left[1 + \left(\frac{+}{n_l} \right)^2 \right];$$

$$= \frac{H_0}{2(r_2 - r_1)}; \quad (5)$$

$$\overline{P}_{1-2-5-6} = \frac{P_{1-2-5-6}}{\Sigma_s V_0} = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{k_v}{0} \times \left(\frac{2r_1}{H_0(n+1)} \times \left(\left(z_3^2 + \frac{r_2}{r_1} z_2^2 \right) - \left(\frac{z_2^{n+1}}{z_3^{n-1}} + \frac{r_2}{r_1} \frac{z_3^{n+1}}{z_2^{n-1}} \right) \right) + \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right); \quad (6)$$

где

$$0 = 2 \frac{R_1^2 - KR_0^2}{H_0 s_0 n_l}, \quad 1 = \frac{1 - K}{\left(\frac{R_1}{R_0} \right)^2 - 1},$$

s_0 – толщина лопатки в прикорневом сечении;

$K=1$ для диска, штампуемого локальным приложением деформирующего усилия;

$K=0$ для диска, деформируемого приложением нагрузки по всей поверхности торца.

Анализ на экстремум мощности деформирования $P_\Sigma(n)$ в ободу диска по параметру n , задающему форму границы ОПД $F(r,z)=0$, определил ярко выраженный минимум в интервале значений $n = 1.1 \dots 1.4$ для различных типоразмеров дисков с лопатками.

Для каждой лопатки работа формообразования A_l определялась выражением

$$\overline{A}_l = \frac{A_l}{\Sigma_s V_0} = H_0 R_m^2 \left(\frac{4}{\sqrt{3}} + \left(1 - \frac{1 + \ln \frac{R_m}{r_m}}{\frac{R_m}{r_m}} \right) \right), \quad (7)$$

где

– коэффициент трения;

– угол схождения образующих лопатки;

R_m, r_m – радиусы, ограничивающие ОПД в лопатке (рис.4).

Мощность P_k , затрачиваемая на формообразование центральной пере-

мычки (для диска с центральной частью), находилась по известной формуле:

$$\frac{P_k}{V_0 \Sigma_s} = \frac{r_0^2}{0} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{r_0}{h_k} \right), \quad (8)$$

где h_k – текущая средняя толщина центральной перемычки.

Удельное усилие формообразования p , приведённое к площади F сечения ОПД на входе в перо лопатки, определялось суммированием удельных мощностей деформирования по всем областям цельноштампованного диска:

$$p = \Sigma_s \frac{\overline{P}_\Sigma + \overline{P}_{1-2-5-6} + \overline{P}_{2-6-4} + \overline{P}_{2-6-12} + \frac{1-K}{n_l} \overline{P}_k}{F} + \frac{\overline{A}_l}{V_l}, \quad (9)$$

$$F = s_0 H_0.$$

Энергия, требуемая для формообразования, определялась как $E = p V_l n_l$.

В таблице 1 приведены результаты расчёта энергии деформирования реальных дисков с лопатками, в таблице 2 – сравнительные данные по энергии деформирования опытных штампованных дисков с лопатками для трёх различных схем формообразования. Приведённые в таблице 2 данные получены экспериментально и аналитически по изложенной выше методике.

Результаты экспериментов показали, что формообразование цельноштампованных дисков с лопатками по первой и третьей схемам происходит в две стадии:

- распрессовка;
- выдавливание материала в полость граวยоры пера лопаток.

Формообразование поковок по второй схеме производится в три стадии:

- распрессовка;
- оформление перемычки и торцевой части фланца прошивкой и обратным выдавливанием,
- окончательное оформление ступицы диска и радиальное выдавливание пера лопатки.

Первая схема формообразования менее энергоёмкая по сравнению со второй схемой, поскольку в силу особенности конструкции самого изделия (отсутствие центральной перемычки) не расходуется энер-

гия на её формообразование. Удельная работа деформирования и соответствующий ей коэффициент влияния геометрии штамповки (отношение удель-

ной энергии деформирования к пределу текучести материала) для третьей схемы с локальным приложением нагрузки существенно меньше, чем для второй.

Таблица 1. Расчётные величины энергии формообразования

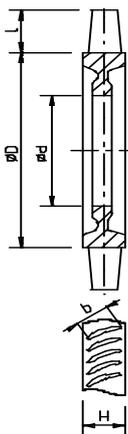
| № п/п | Параметры диска с лопатками | | Работа деформирования, КДж | |
|-------|--|---|--|-------------------------------|
| | | | Приложение нагрузки по всему торцу диска | Локальное приложение нагрузки |
| 1 |  | D=543мм, d=497мм, l=55.5 мм, H=43мм, b=32 мм, 44 лопатки, толщина перемычки=7мм | 781.2 | 500.8 |
| 2 | | D=190.4мм, d=164мм, l=35 мм, H=21мм, b=22 мм, 15 лопаток, толщина перемычки=3.8мм | 68.3 | 53 |

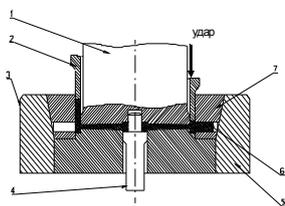
Таблица 2. Параметры формообразования цельноштампованных дисков с лопатками

| № схемы | Наименование схемы формообразования | Скорость истечения металла, м/с | Удельная работа деформирования, КДж | | Коэффициент влияния геометрии штамповки | Коэффициент оформления пера |
|---------|--|---------------------------------|-------------------------------------|------------|---|-----------------------------|
| | | | Эксперимент | Расчетная | | |
| 1 | Приложение нагрузки по всей площади торца диска | 116 (max) | 2024 (min) | 1961 (min) | 5.10 (min) | 0.92 (mid) |
| 2 | Приложение нагрузки по всему торцу диска с перемычкой | 116 (max) | 2627 (max) | 2731 (max) | 6.57 (max) | 0.95 (max) |
| 3 | Локальное приложение нагрузки для дисков с кольцевой ступицей и перемычкой | 79.2 (min) | 2346 (mid) | 2367 (mid) | 5.86 (mid) | 0.9 (min) |

Примечание: Экспериментальные значения в таблице взяты как среднее арифметическое по 10 испытаниям.

Несмотря на то, что по первой и второй схемам деформирования штампуется основная номенклатура дисков с лопатками цельной конструкции, эти схемы являются самыми неблагоприятными. В процессе штамповки металл перемещается от центра к периферии. При таком характере течения металла усилие сопротивления деформации высокое, пик его проявляется на стадии доштамповки, и в то же время скорость деформирования, а следовательно, и мощность к концу хода движущихся частей молота падают. Кроме того, большие площади контакта металла и пуансона требуют значительных усилий для преодоления контактного трения. Отмеченные явления становятся более значимыми с увеличением размеров дисков с лопатками цельной конструкции.

В связи с этим наиболее целесообразно штамповать крупногабаритные диски с лопатками по третьей схеме деформирования, использующей локальное приложение деформирующего усилия. Течение металла в радиальные лопаточные каналы штампа осуществляется при этом из набранной массы по торцу обода диска. Для формования подобных дисков с центральной переключкой последнюю в процессе деформирования необходимо удерживать прижимом по всей площади контакта (рис. 5).



1—прижим; 2 – пуансон; 3– штамп;
4 – выталкиватель; 5 –обойма штампа;
6 –заготовка; 7 – профильная вставка штампа

Рис. 5 Схема формования дисков с лопатками с прижимом центральной части

Лучшее заполнение гравюры пера лопаток штамповых вставок цельноштампованных дисков с лопатками достигается при формовании по второй схеме; худшее – по третьей. Коэффициент оформления пера лопатки – отношение длины более тонкой выходной кромки к более толстой входной – составляет соответственно 0,95 и 0,9. Отмеченное явление можно объяснить величиной скорости истечения металла. Известно, что увеличение скорости истечения металла при выдавливании повышает степень заполнения штамповой оснастки вследствие благоприятного действия инерционных сил массы разогнанного металла.



Рис. 6 Образцы дисков с лопатками, отштампованные по трём схемам

На рис. 6 приведены цельноштампованные диски с лопатками, изготовленные согласно трём схемам формования.

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Незначительные расхождения полученных расчётных значений и экспериментально установленных значений величин энергии деформирования на моделях дисков с лопатками подтверждают правомерность применения аналитического расчёта для обоснования оптимальной схемы формования реальных дисков.

2. Для изготовления крупногабаритных цельноштампованных дисков с лопатками наиболее целесообразно использовать третью схему деформирования, предусматривающую приложение локальной нагрузки, с применением кольцевой заготовки или заготовки с заранее отформованной центральной частью.

3. Третья схема обладает следующими преимуществами:

– значительно уменьшается работа формования;

– увеличивается номенклатура изготавливаемых деталей;

– увеличивается стойкость штамповой оснастки и точность размеров цельноштампованных дисков с лопатками.

4. Благодаря увеличению скорости истечения металла улучшается заполняемость радиальных каналов штампа и соответственно повышается точность оформления лопаток диска.

Библиографический список

1. Согришин, Ю.Н., Гришин Л.Г., Воробьев, В.М. Штамповка на высокоскоростных молотах [Текст]/ Ю.Н. Согришин, Л.Г. Гришин, В.М. Воробьев.– М: «Машиностроение», 1978.

References

1. Sogrishin, Yu. N. High-speed hammer forging [Text] / Yu. N. Sogrishin, L. G. Grishin, V. M. Vorobyev. – M.: Mashinostroyeniye, 1978.

EXPERIMENTAL DEFINITION OF THE OPTIMUM SCHEME OF SHAPING FORGED IMPELLERS BY HIGH-SPEED FORGING

© 2010 A. I. Khaimovich

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

Three schemes of high-speed forging of impellers are investigated. For the manufacturing of large-sized impellers with radial location of blades the scheme with application of concentrated (local) loading is recommended. The scheme possesses the following advantages: it decreases the deformation work; increases the nomenclature of details made with the existing equipment; increases die block wear resistance and the accuracy of the geometrical sizes of blades. The high speed metal flow at the final stage of forging improves the fill ability of radial channels of dies and accordingly raises the accuracy of blade shape.

High speed forging, impellers, deformation force, die block wear resistance.

Информация об авторах

Хаймович Александр Исаакович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: технология машиностроения. E-mail: kovalek68@mail.ru.

Khaimovich Aleksander Isaakovitch, candidate of technical sciences, associate professor of the department of aircraft engine production, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: technology of mechanical engineering. E-mail: kovalek68@mail.ru.