

УДК 621.438.002.2

Чигиринский В. В.
Бень А. Н.
Кресанов Ю. С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ВЫДАВЛИВАНИИ ЗАГОТОВОК КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК

Деформированное состояние металла различных процессов обработки металлов давлением зависит от многих факторов, включая контактное трение, геометрию инструмента, способ обработки, температуру заготовки, скорость деформации металла, обжатие и т. д. [1]. При выдавливании течение металла с учетом влияния контактного трения в приемном контейнере представлено на рис. 1 [2]. Особенностью такого влияния является разная кинематика течения металла как в самом контейнере, так и за пределами матрицы.

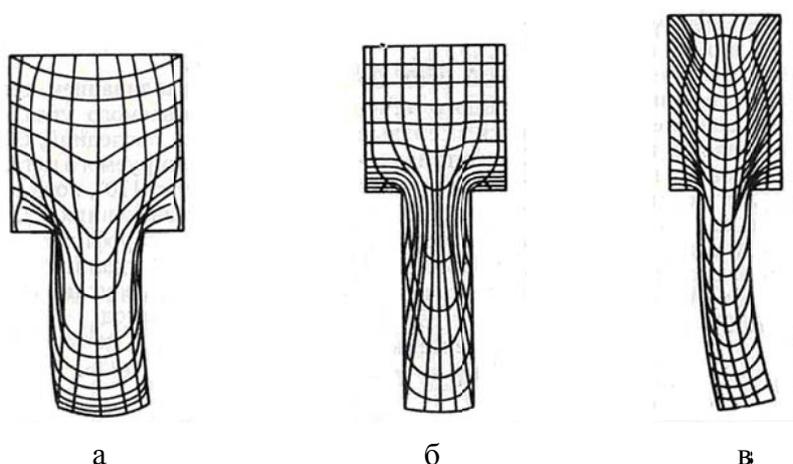


Рис. 1. Схемы течения металла при прессовании

На рис. 1, а видно, что центральные слои заготовки в области отверстия интенсивно деформируются в продольном направлении. Периферийные участки наслаиваются в заплечиках матрицы по бокам отверстия, при этом изменяется ориентировка поперечных слоев. Ширина пластически деформируемой зоны в этом случае максимальна [3]. На рис. 1, б показано течение металла, для которого ширина пластической зоны в области отверстия минимальна. Она сужена за счет наслаивания периферийных слоев заготовки в заплечиках матрицы. Разная кинематика течения металла через отверстие (рис. 1, а, б) приводит к разному деформированному состоянию изделия за его пределами. В случае широкого отверстия центральные слои заготовки заполняют большую часть пространства изделия, деформируясь интенсивно не только в продольном, но и поперечном направлении. Периферийные слои выходят на боковую поверхность изделия. В случае узкого деформационного отверстия центральные слои заготовки заполняют меньшую часть пространства изделия, интенсивно сжимая в поперечном направлении периферийные слои. На конце заготовки центральные слои выходят на поверхность, заполняя большую часть пространства готового изделия. Особенностью течения металла, представленном на рис. 1, в, является деформационный срез периферийных участков заготовки заплечиками матрицы. Изделие формируется, в основном, за счет центральных слоев заготовки, имея максимальную ширину деформационного отверстия в матрице.

Достаточно подробный анализ формоизменения металла работ [2, 3] необходим для более детального анализа пульсирующего течения металла при выдавливании лопаток.

Целью работы является изучение и объяснение сложной кинематики течения металла при выдавливании заготовок компрессорных лопаток авиадвигателей.

Деформированное состояние металла при выдавливании лопаток исследовалось с помощью винтов-«свидетелей», вкрученных в исходную заготовку [4]. В заготовке сверлились отверстия под резьбу М5, в которые вворачивались винты, изготовленные из того же материала, что и заготовка – сплав титана ВТ-8 ОСТ 90006-86. На рис. 2 показана заготовка под выдавливание лопатки (до предварительного плющения – 2, а и после него – 2, б).

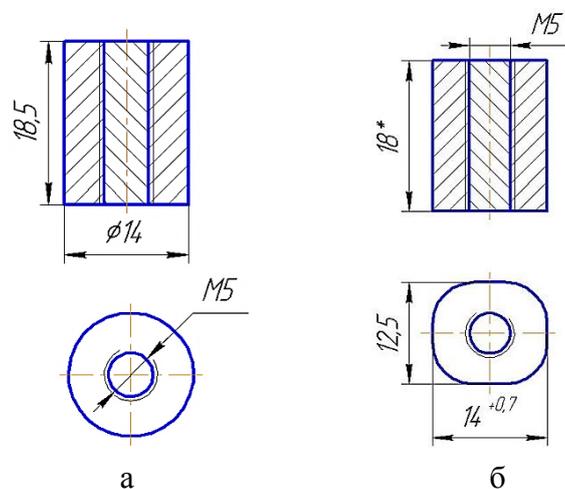


Рис. 2. Заготовка под выдавливание лопатки:
а – до предварительного плющения; б – после плющения

Схема расположения «свидетелей» по сечению в заготовках под выдавливание компрессорных лопаток после плющения показана на рис. 3.

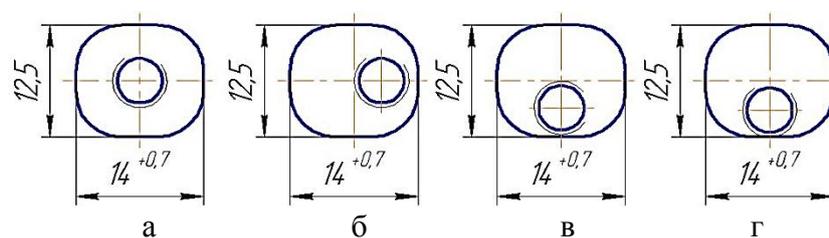


Рис. 3. Схемы положений винтов – «свидетелей» в заготовке под выдавливание лопатки компрессора

Смещение «свидетелей» вдоль радиуса позволяет определить деформированное состояние в объеме тела. Для некоторых схем расположения «свидетелей» отбиралось несколько проб не полностью продеформированных заготовок (табл. 1). Обжатые заготовки разрезались поперек пера лопатки по центру винта. Сечение проводилось методом электроэрозионной порезки толщиной электрода 0,2 мм.

Таблица 1

Параметры продеформированных проб

№ п/п	1	2	3	4	5
Схема расположения «свидетеля»	3,б	3,б	3,в	3,а	3,г
Обжатие, мм	5,6	6,8	9,0	9,3	9,4
Относительная деформация, %	30,3	36,8	48,6	50,3	50,8

После порезки и отработки сечения фотографировались и производились необходимые замеры на микроскопе МИМ-8М с использованием окуляра-микрометра К7^х 60-кратного увеличения.

Продольная деформация «свидетеля» в каждой точке определялась выражением:

$$\varepsilon_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0},$$

где l_0 , l_1 – расстояния между витками «свидетеля» до и после деформации.

На рис. 4 представлены пробы и заготовки лопаток со «свидетелями» после деформации.

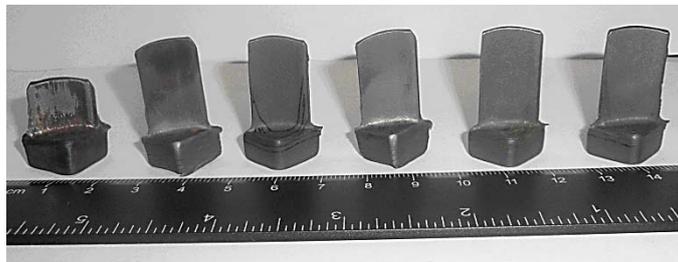


Рис. 4. Продеформированные заготовки со «свидетелями»

Показаны фотографии разрезов со «свидетелями» после выдавливания с различными продольными обжатиями (рис. 5). На рис. 5, а и 5, б изображены разрезы заготовок лопаток со смещенными «свидетелями» согласно рис. 3, б. Для этой схемы продольные обжатия равны 5,6 и 6,8 мм, что соответствует относительной деформации 30,3 % и 36,8 %.

На рис. 5, в показан разрез заготовки со смещенным «свидетелем» согласно схеме 3, в. Продольное обжатие 9,0 мм, деформация составила 48,6 %. Разрез заготовки со смещенным «свидетелем» согласно схеме 3, а представлен на рис. 5, г. Продольное обжатие 9,3 мм, деформация составила 50,3 %. На рис. 5, д показан разрез заготовки со смещенным «свидетелем» согласно схеме 3, г. Продольное обжатие 9,4 мм, деформация составила 50,8 %.

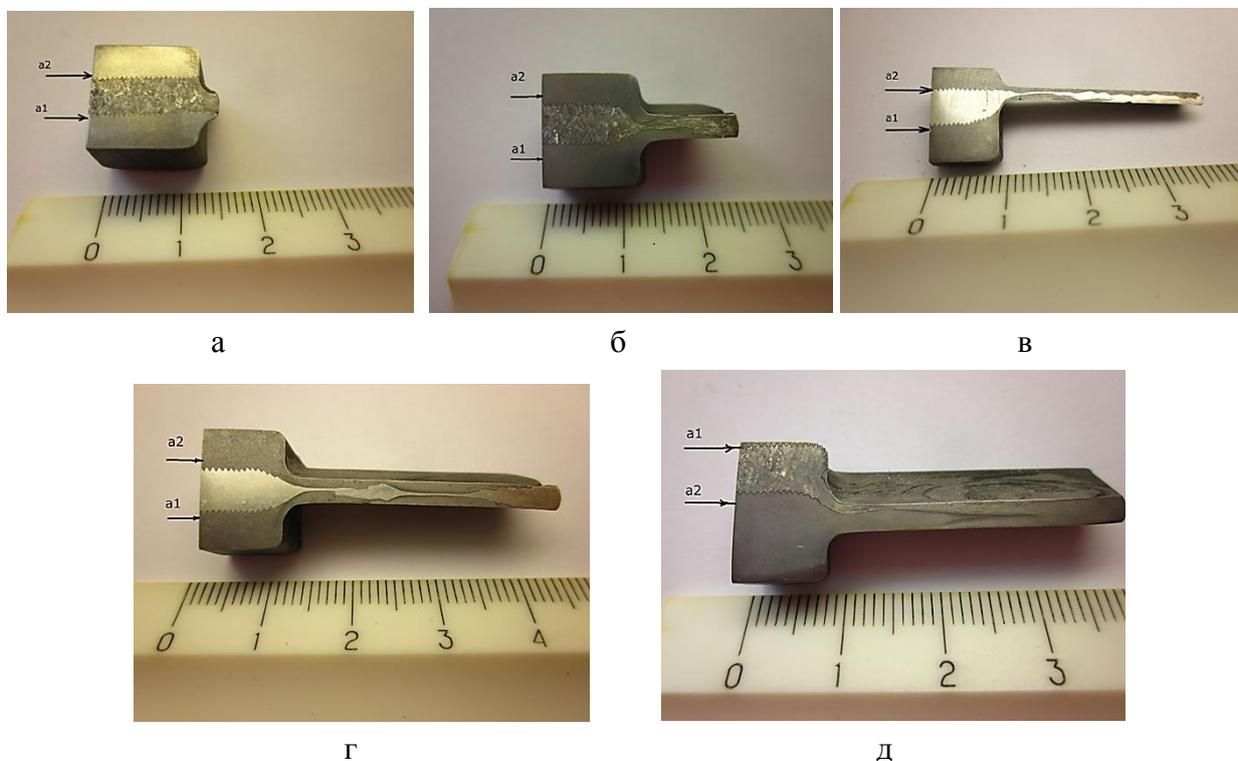


Рис. 5. Сечения заготовок лопаток, выдавленных с постепенным увеличением длины пера

Представлены экспериментальные данные, полученные в результате замеров относительной деформации «свидетелей» в объеме заготовки (рис. 6). Каждый свидетель обмерялся с двух сторон, что соответствует двум кривым на рис. 6. На рис. 5 стрелками указаны стороны «свидетелей».

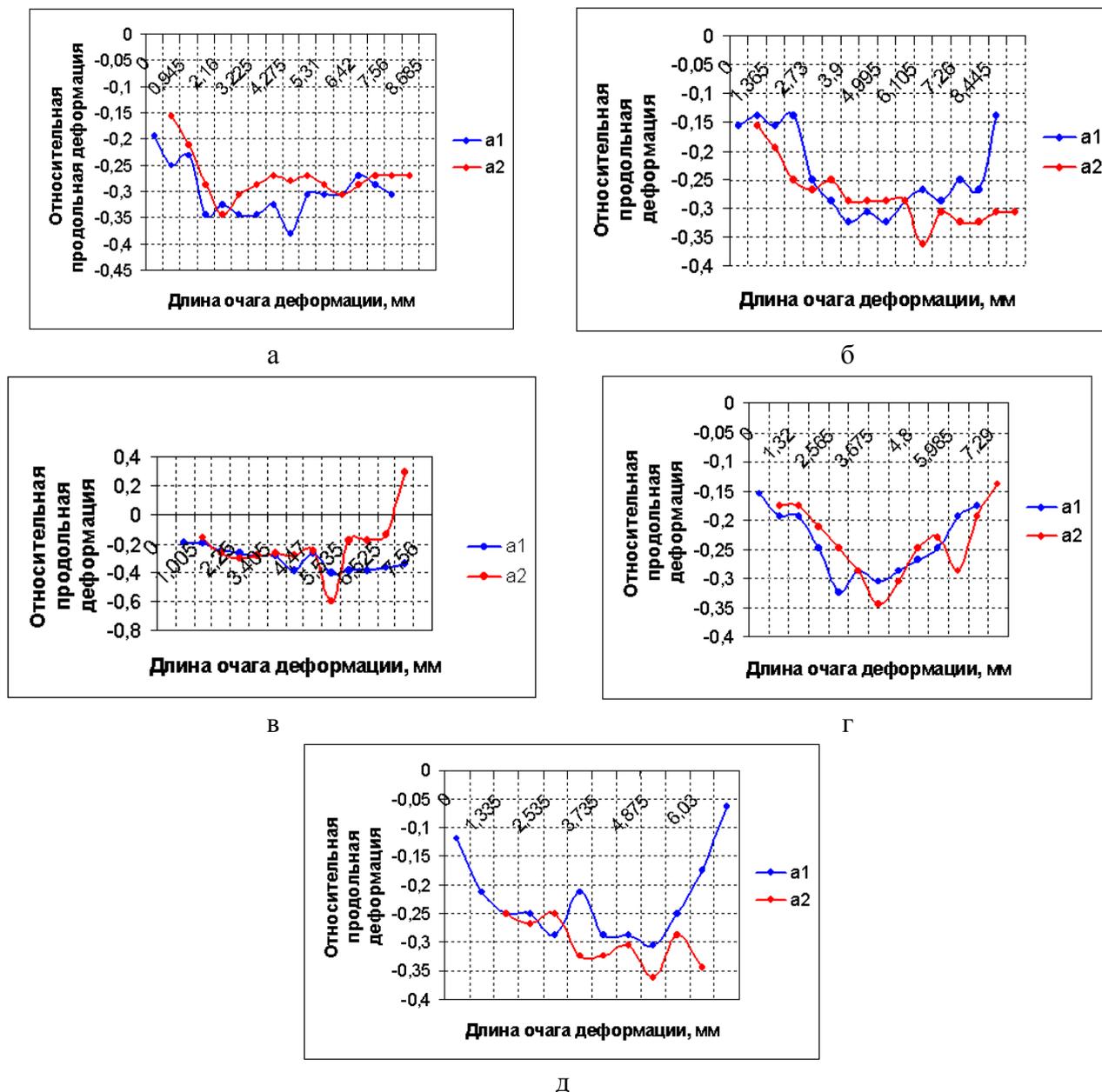


Рис. 6. Распределение продольных деформаций в замочной части заготовки лопатки

Замеры деформаций проб по схеме 3, б (рис. 6, а, б) проводились на расстояниях 8,685 мм и 8,445 мм. Характер изменения продольных деформаций сжатия примерно одинаков и по форме кривых, и в количественном отношении. Переход от состояния б,а к состоянию б,б сопровождается незначительными пластическими деформациями в области замочной части. Замеры проб по схемам 3, в и 3, г производились на расстояниях 6,69 мм и 7,47 мм (рис. 6, в, д). Они несколько меньше предыдущих проб из-за большего обжатия и меньшей высоты замочной части. «Свидетели» смещены в направлении укороченного диаметра, рис. 3, в, г. После деформации крайний «свидетель» выходит на боковую поверхность заготовки, рис. 5, д. Характер кривых на этих графиках (рис. 6, д) отличается от предыдущих. Особенностью является резко обозначенный максимум и значительная разница деформаций левой и правой половины винтов (рис. 6, д) перед входом в отверстие

матрицы. «Провал» на графике объясняется появлением растягивающих продольных деформаций в указанных зонах заготовки. Это связано с изменением кинематики течения металла через отверстие в матрице.

Анализ экспериментальных данных показывает, что относительные деформации изменяются относительно своего среднего значения (рис. 6), равного $-0,3$. Это соответствует начальной стадии формирования пера лопатки (рис. 5, а, б, табл. 1, поз. 1, 2). Из этого следует, что деформированное состояние в области замочной части во времени и в объеме изменяется в среднем незначительно. Для каждого перехода имеет место разброс данных по длине заготовки относительно начальной величины средней деформации. Кривые (рис. 6) имеют выпуклый характер с максимальной деформацией в средней части длины утолщения лопатки. Нулевая точка на оси абсцисс (рис. 6) соответствует контакту с пуансоном, конечная точка – входу в отверстие матрицы. Те продольные слои, которые ближе к отверстию матрицы при входе (рис. 6, б, в, д), имеют деформацию сжатия меньше, чем слои расположенные ближе к периферии заготовки. На рис. 6, в центральный слой относительно отверстия при формоизменении изменяет знак деформации. На этой же кривой обозначен местный пик сжатия, достигающий величины $-0,61$.

На рис. 5, в, г, д показаны сечения в почти полностью продеформированных заготовках (табл. 1 – 48,6 % и 50,8 %). В этом случае сформировано поле деформаций сжатия или растяжения перед входом в отверстие матрицы. График на рис. 6, г относится к случаю, когда винт расположен по центру заготовки (рис. 3, а). Характер распределения деформации для обеих кривых примерно одинаков. На пуансоне и перед входом в отверстие относительные деформации одинаковы и находятся в пределах $0,15 \dots 0,18$. Их максимальные значения $0,32 \dots 0,35$ в средней части длины очага деформации. Меньшие значения относительных обжатий под пуансоном для обеих кривых объясняются наличием зон заторможенных деформаций, а перед входом в очаг интенсивной деформации – изменением знака продольной деформации и переходом от сжатия к растяжению.

Представляет интерес то, что с увеличением общей продольной деформации (табл. 1, 48,6...56,8 %) средние значения деформаций в зоне замочной части несколько снижаются (рис. 6, г, д) с $-0,30$ до $-0,25$. Это объясняется интенсивной пластической деформацией в зоне отверстия матрицы в продольном направлении при формировании пера лопатки. При этом центральные слои заготовки подвержены деформационному растяжению (рис. 1), что уменьшает общее сжатие в продольном направлении.

Деформированное состояние пера лопатки характеризуется неравномерностью пластического течения металла в плоскости в значительно большей степени, чем замочной части (рис. 5). В относительно тонком слое металла происходят большие перемещения как в продольном, так и в поперечном направлениях. «Свидетель» в зоне пера имеет два утолщенных и два утоненных участка. Из этого можно сделать вывод, что продольное течение металла через отверстие в матрице в перьевую зону носит пульсирующий неустановившийся характер. Присутствуют участки, в которых перо лопатки формируется за счет металла, поступающего из центральных слоев заготовки, и участки, формирование которых определяется металлом, поступающим из периферийных зон.

На рис. 5, а, б показано формирование переднего конца пера лопатки. При выходе из отверстия конец пера формируется за счет металла, поступающего из центральных слоев заготовки. Происходит заполнение всего пространства, включая поверхность лопатки. Такое состояние находится в соответствии с данными работ [2, 3] (рис. 1). Наблюдается интенсивная деформация не только в продольном, но и в поперечном направлениях. Дальнейшее продвижение металла через отверстие изменяет характер его течения. Поперечные слои металла в заготовке перед отверстием матрицы изменяют свое направление (в области заплечиков матрицы) на продольное, что сопровождается значительными сдвигами. Слои искривляются и наслаиваются друг на друга, сужая отверстие (рис. 1, б). Поступление металла из центральной зоны толстостенного участка заготовки резко уменьшается. Область лопатки, сформированная центральным течением металла, заканчивается, образуя переднее утолщение «свидетеля»

(рис. 5, б). На рис. 5, в–д представлены фотографии сечений, в которых обозначились утолщения и утонения винтов в области пера лопатки как для смещенных «свидетелей» (рис. 5, в, д), так и для центральных (рис. 5, г).

Боковые наслоения проникают в тонкостенную часть профиля с выходом на поверхность лопатки, сужая пространство для центральных слоев. Когда наслоения достигают критических размеров, под действием новых порций поступающего металла срезаются (рис. 1, в). Расширяется отверстие, заканчивается зона утоненного центрального «свидетеля». Тонкостенная часть профиля формируется за счет центрального течения металла, образуя второе утолщение винта. Процесс пульсации повторяется, и за вторым утолщением появляется вторая зона утонения «свидетеля».

На каком-то этапе формоизменения можно считать, что деформация плоская, т. к. ширина пера примерно равна диагонали замочной части [5]. Значительные перемещения в тонкостенной зоне в продольном и поперечном направлениях формируют деформационную неоднородность в разных точках готового изделия. Интенсивные перемещения в разных направлениях в тонкостенном элементе определяются пульсирующим попеременным поступлением металла из центральных и периферийных зон заготовки.

За счет пульсирующего перемещения металла через отверстие в матрице центральных и периферийных слоев формируется значительная неоднородность деформированного состояния, что может сказаться на механических характеристиках готового изделия.

ВЫВОДЫ

Деформационная неоднородность пластического течения металла в тонкостенной перьевой части значительно больше неоднородности течения металла в замочной части.

Продольное течение металла в области тонкостенной части профиля является неустановившимся и пульсирующим.

В области пера лопатки деформированное состояние отличается значительной неравномерностью как в продольном, так и в поперечном направлении.

Состояние металла в области замочной части и тонкостенной связано между собой и оказывает друг на друга деформационное воздействие.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов В. С. *Теория обработки металлов давлением [Текст]* / В. С. Смирнов. – М. : *Металлургия*, 1973. – 496 с.
2. Сторожев М. В. *Теория обработки металлов давлением [Текст]* / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : *Машиностроение*, 1977. – 424 с.
3. Ребельский А. В. *Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки [Текст]* / под ред. С. С. Соловцова. – М. : *Машиностроение*, 1965. – 248 с.
4. *Производство высокоэффективного металлопроката [Текст]* / В. В. Чигиринский, В. Л. Мазур, Г. В. Бергеман, Г. И. Леготкин, А. Г. Слепынин, Т. Г. Шевченко. – Днепропетровск : *Днепро-ВАЛ*, 2006. – 262 с.
5. *Влияние параметров горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток компрессора на качество их изготовления [Текст]* / Ю. С. Кресанов, А. Я. Качан, В. В. Чигиринский, А. Н. Бень // *Вестник двигателестроения. – Запорожье*, 2009. – № 2. – С. 108–115.

Чигиринский В. В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ЗНТУ;

Бень А. Н. – аспирант ЗНТУ;

Кресанов Ю. С. – канд. техн. наук, вед. инж. ПОА «Мотор Сич».

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

ПОА «Мотор Сич» – Публичное акционерное общество «Мотор Сич», г. Запорожье.

E-mail: valerij@zntu.edu.ua; BenAnna1985@yandex.ru