

УДК 621.73.042.01

Пчельников А.В., Казадаева О.А.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ QFORM ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ КОВКИ ПРУТКОВ

Аннотация. Исследованы процессы ковки прутка большого диаметра на гидравлическом прессе с помощью моделирования. В работе показаны результаты моделирования процессов ковки прутка в программе Qform. Приведены значения сопротивления деформации сплава Inconel 718, используемые при моделировании процессов. Показаны различия в деформации заготовки при ковке различным инструментом с различной подачей и величиной обжатия не только с точки зрения накопления деформации, но и с точки зрения вероятности возникновения дефектов в заготовке. Для прогнозирования появления возможных деформационных дефектов выполнен расчет накопления поврежденности при ковке. Для расчета поврежденности использована формула Кокрофта-Лэтэма.

Ключевые слова: ковка, сопротивление деформации, Inconel 718, поврежденность, Qform, критерий Кокрофта-Лэтэма.

Повышение качества изделий является важной задачей для каждого предприятия. Полуфабрикаты, получаемые штамповкой из деформируемых сплавов, должны обладать достаточно мелкой структурой и отсутствием дефектов, таких как поры, разрывы, трещины и др. Особенно для сплавов на основе никеля, используемых для изготовления дисков газотурбинных двигателей, работающих при высоких температурах, повышение накопленной степени деформации и уменьшение трещин, которые возникают из-за низкой пластичности сплавов, всегда является актуальной задачей. В направлении улучшения деформации прутка за счет изменения геометрии инструмента уже опубликовано много работ [1–4]. Одним из возможных путей улучшения структуры прутка может быть не только изменение геометрии рабочей части инструмента, но и выбор оптимальных режимов деформирования, которые обеспечили бы наилучшую деформацию во всем сечении прутка при минимальном образовании дефектов в виде трещин на поверхности.

В работах Алиева И.С., Жбанкова Е.Г. и других [1, 2, 4] представлены исследования накопления деформации за счет макросдвигов несимметричным инструментом. Однако описанный Алиевым И.С. и другими исследователями подход приводит к дополнительным сдвигающим нагрузкам и значительно усложняет инструмент и процесс ковки. Высокая склонность некоторых сплавов к образованию трещин на поверхности при деформации делает практически невозможным применение такой технологии ковки при низкой пластичности материала.

Увеличение степени деформации при ковке прутков и биллетов может не только улучшить структуру заготовки, но и ускорить процесс получения биллета. Таким образом, при определении технологии ковки биллетов производители стремятся увеличить степень деформации, что часто может привести к значительному увеличению количества дефектов на поверхности. Целью данной работы является исследование различных вариантов ковки не только с точки зрения равномерности и величины накопленной степени деформации, но и с точки зрения образования дефектов внутри и на поверхности заготовки.

Моделирование выполнено в программе Qform V8. В работе рассмотрено несколько вариантов геометрии бойков: плоские, вырезные бойки с углом выреза 100, 120 и 135°, комбинированные и круглым вырезом с углом охвата 120°. Заготовка для моделирования ковки на прессе взята диаметром 400 мм из никелевого сплава Inconel 718. Температура нагрева заготовки под деформацию 1040°C. Сопротивление деформации данного материала при моделировании задано с помощью уравнения [5]

$$\sigma = \sigma_p (1 - \exp(-C_\varepsilon))^{1/2} - (\sigma_p - \sigma_s) \left(1 - \exp \left(- \ln 2 \left(\frac{\varepsilon - \beta_{ap}}{\varepsilon_p} \right)^m \right) \right);$$

$$\sigma_p = a_1 \bar{\varepsilon}^{b_1} \exp \left(\frac{c_1 Q}{RT} \right),$$

$$\sigma_s = a_2 \bar{\varepsilon}^{b_2} \exp \left(\frac{c_2 Q}{RT} \right),$$

$$C = a_3 \bar{\varepsilon}^{b_3} \exp \left(\frac{c_3 Q}{RT} \right),$$

$$\varepsilon_p = a_4 \bar{\varepsilon}^{b_4} \exp \left(\frac{c_4 Q}{RT} \right),$$

где σ – сопротивление деформации;
 σ_p – максимальное напряжение течения;
 σ_s – установившееся сопротивление деформации;
 $\bar{\varepsilon}$ – скорость деформации;
 ε – степень деформации;
 T – температура;
 R – универсальная газовая постоянная.
 Энергия активации $Q=400$ кДж/моль.

Коэффициенты для уравнения подобраны с целью получения хорошей сходимости результатов расчета сопротивления деформации с результатами эксперимента, приведенными в работе Yan-Xing Liu, Y.C. Lin и других [6].

Коэффициент	1	2	3	4
a	0,1	60	2	0,08
b	0,12	0,5	0,3	0,15
c	162	3	0,1	0,001

© Пчельников А.В., Казадаева О.А., 2020

Сравнение графиков сопротивления деформации в зависимости от температуры и скорости деформации, полученные расчетом и результатами эксперимента, приведены на рис. 1.

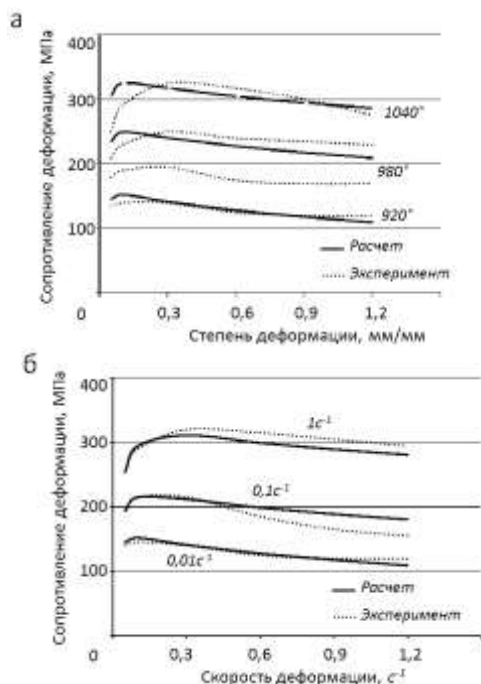


Рис. 1. Сопротивление деформации:
а – при скорости деформации $0,01\text{c}^{-1}$;
б – при температуре 1040°C

Проведено моделированиековки прутка протяжкой. При этом подача составляла 70, 120, 170 и 220 мм, что соответствует отношению подачи к диаметру заготовки 0,3, 0,4 и 0,5 соответственно. Скорость движения инструмента 30 мм/с. Ковка осуществлялась за 4 прохода с поворотами на угол 90, 45, 90° после каждого прохода.

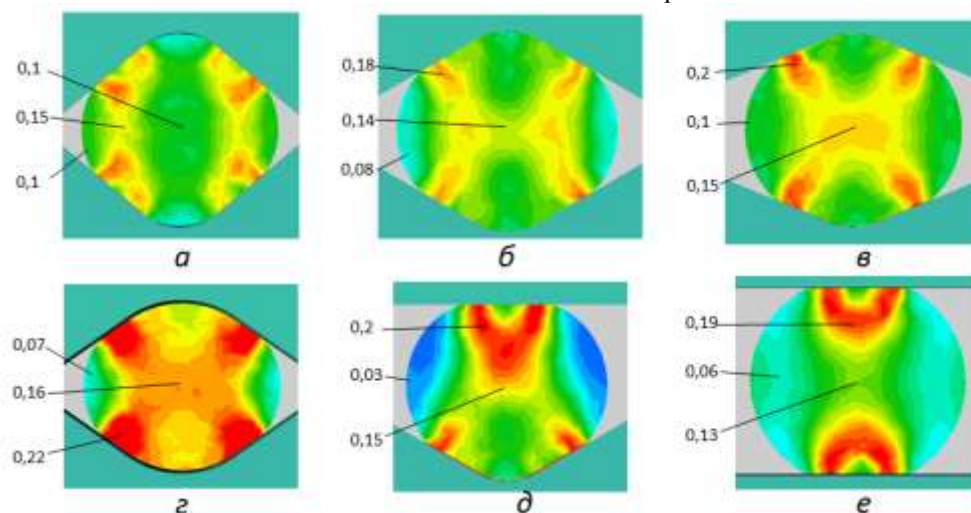


Рис. 2. Деформация, накопленная за одно обжатие прутка, при ковке:
а – бойки с углом выреза 100° ; б – 120° ; в – 135° ; г – круглым вырезом; д – комбинированные бойки;
е – плоские бойки

На рис. 2 приведены поля накопленной деформации после 1-го обжатия. Степень деформации приведена в логарифмическом виде. На рис. 2 хорошо видна форма очага деформации. При ковке бойками с углом выреза 100° (рис. 2, а) отчетливо видно, что очаг деформации не проходит через центр прутка. Середина прутка в таком случае остается менее деформированной, чем в остальных случаях. При ковке бойками с углом выреза более 100° деформация в осевой зоне становится больше (рис. 2, б, в). Наибольшую степень деформации центральной части заготовки обеспечивает ковка в бойках с круглым вырезом (рис. 2, г).

На рис. 3 показаны результаты, полученные при ковке с различной подачей и величиной обжатий. Результаты сведены в график зависимости деформации в центре (рис. 3, а) и на поверхности (рис. 3,б) от величины подачи. По графикам видно, что подача оказывает значительное влияние на величину накопленной деформации, как в центре, так и на поверхности, но в случаековки бойками с круглым вырезом влияние подачи на деформирование поверхности минимально. При увеличении подачи с 70 до 220 мм степень накопленной деформации в этом случае изменяется не более чем на 0,05.

Очевидно, что величина обжатий прутка при ковке оказывает большое влияние на накопление деформации, и гораздо большее, чем величина подачи. Увеличение обжатия прутка при ковке приводит к практически линейному увеличению деформации как в центре, так и на поверхности (рис. 4). Вариантковки бойками с углом выреза 100° имеет наименьшую величину деформации в центре, как и было показано на рис. 2, а, а при увеличении обжатия прирост осевой деформации значительно меньше, чем в других вариантахковки. Ковка на плоских бойках показала самую большую степень деформации поверхности среди остальных вариантовковки.

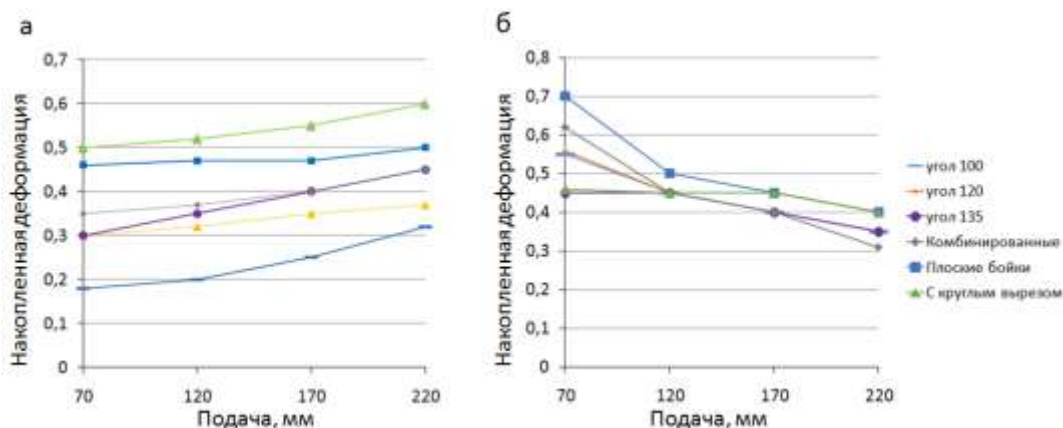


Рис. 3. Зависимость накопленной деформации прутка от подачи при величине обжатия 40 мм: а – в центре; б – на поверхности.

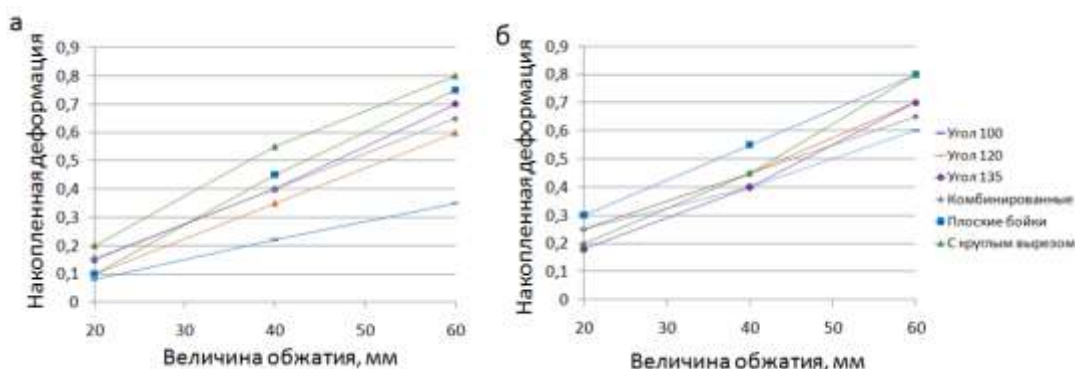


Рис. 4. Зависимость накопленной деформации прутка в зависимости от величины обжатия при подаче 220 мм: а – в центре; б – на поверхности

Величина накопленной степени деформации оказывает значительное влияние на структуру заготовки, но при увеличении величины обжатий, в значительной степени возникает вероятность появления трещин на ковальной поверхности и в центре прутка из-за низкой пластичности сплавов. Поэтому оценку оптимальности процесса необходимо проводить и с точки зрения появления внутренних дефектов, и трещин на поверхности. Для этого можно использовать величину накопленной поврежденности. Применение величины поврежденности для оптимизации процессов описано и в работах [7, 8]. Величина параметра поврежденности в данной работе была рассчитана по формуле Кокрофта-Лэтэма

$$D = \int_0^{\varepsilon} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\varepsilon,$$

где σ^* – максимальные растягивающие напряжения;
 σ – напряжение течения;
 ε – степень деформации.

На рис. 5 показана величина накопленной поврежденности при подаче 220 мм в зависимости от величины обжатия. В случаековки на плоских бойках поврежденность значительно больше, чем при ковке любым другим вариантом инструмента (рис. 5,а), что говорит о высокой вероятности формирования дефектов на поверхности заготовки. При ковке бойками с круглым вырезом поврежденность имеет небольшую величину при небольших обжатиях, в сравнении с другими вариантами, что говорит о благоприятных условиях при деформации металла и низкой вероятности возникновения внутренних дефектов под воздействием растягивающих напряжений. Однако величина поврежденности значительно возрастает при увеличении обжатий (рис. 5, б).

На рис. 6 показана зависимость величины накопленной поврежденности от величины подачи протяжки. Значительно выражено увеличение поврежденности при снижении подачи ниже 120 мм во всех вариантахковки, кроме вариантаковки в вырезных бойках с углом выреза 100°. При увеличении подачи более 120 мм величина поврежденности как на поверхности, так и в центре прутка изменяется незначительно.

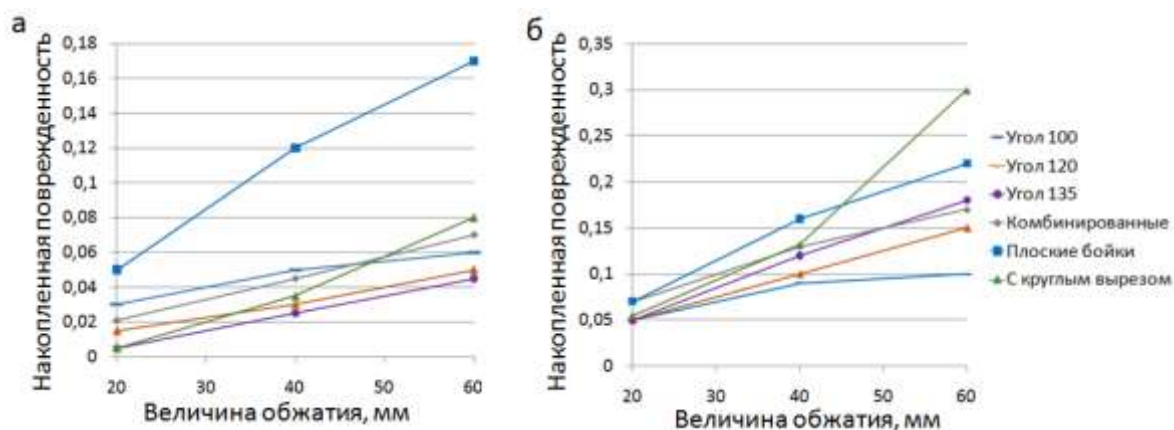


Рис. 5. Величина накопленной поврежденности от величины обжатий при подаче 220 мм: а – в центре; б – на поверхности

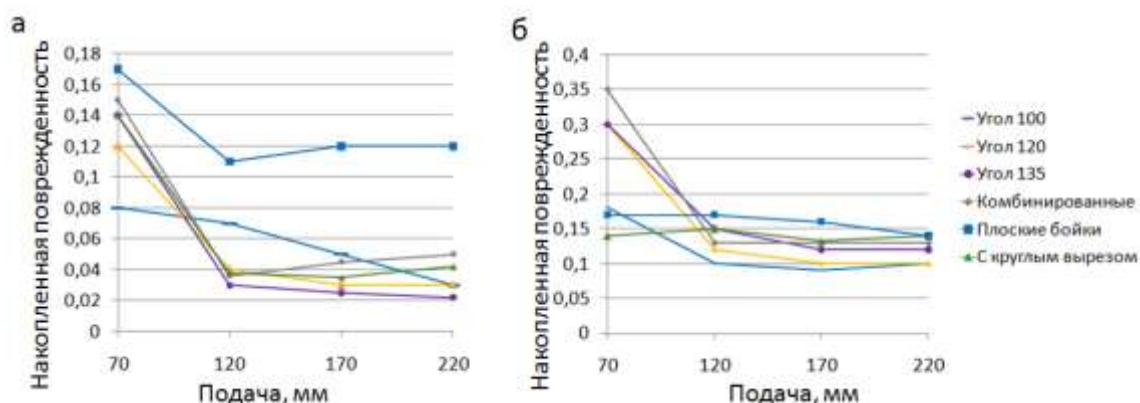


Рис. 6. Величина накопленной поврежденности от величины подачи протяжки при величине обжатий 40 мм: а – в центре; б – на поверхности

Заключение

Из приведенных сравнений видно, что ковка вырезными бойками с углом выреза 100° приводит к низкой проработке центра прутка, судя по низкому значению параметра поврежденности на поверхности, хорошо подходит дляковки малопластичных сплавов. Ковка заготовок на плоских бойках позволяет добиться хорошей деформации в центре и особенно на поверхности заготовки, но количество дефектов, связанных с действием растягивающих напряжений при деформации, о чем говорит большая величина поврежденности, будет значительно больше, чем при ковке вырезными бойками. Круглый вырез бойков обеспечивает большую деформацию в центре прутка, не накапливается большая поврежденность при небольших обжатиях. Однако при значительной величине обжатий поврежденность поверхности резко возрастает (см. рис. 5, б), что негативно скажется на качестве поверхности прутка, и такой вариантковки не будет оптимальным. Ковка комбинированными бойками не имеет значительных преимуществ перед вырезными бойками с углом выреза 120° и 135° ни по накопленной деформации, ни по накопленной поврежденности.

Список литературы

1. Алиев И.С., Жбанков Я.Г., Таган Л.В. Моделирование кузнечной протяжки в комбинированных-бойках несимметричной формы // Вестник НТУ «КПИ». Сер. Машиностроение. 2013. №3. С. 77-83.
2. Алиев И.С., Жбанков Я.Г., Таган Л.В. Направления совершенствования технологийковки крупных поковок на основе управления течением металла // Научный вестник ДГМА. 2012. №1. С. 7-25.
3. Марков О.Е. Исследование технологического процессаковки крупных поковок клиновыми бойками // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. №12. С. 24-27.
4. Алиева И.С., Жбанков Я.Г., Станков В.Ю. Ковка поковок типа валов с продольным сдвигом специальными бойками // Вестник НТУ «КПИ». Сер. Машиностроение. 2013. №43. С. 3-10.
5. Furre D., Goetz R., Shen G., Modeling and Simulation of Alloy 718 Microstructure and Mechanical Properties// 7th international Symposium on Superalloy 718 and Derivatives, TMS, 2010, pp. 663-677.
6. Yan-Xing Liu, Y.C. Lin, Hong-Bin Li, Dong-Xu Wen, Xiao-Min Chen, Ming-Song Chen. Study of dynamic recrystallisation in a Ni-based superalloy by ax-

- periments and cellular automaton model// Material Science & Engineering A 626, 2015, pp. 432-440.
7. Уманский А.А., Кадыков В.Н., Мартыянов Ю.А. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния металла при сортовой прокатке // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2013. № 4. С. 8.
8. Кинзин Д.И., Рычков С.С. Использование программного комплекса Deform-3D при моделировании процессов сортовой прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им.Г.И. Носова. 2011. № 2. С. 45-48.

Сведения об авторах

Пчельников Алексей Викторович – начальник отдела проектирования технологических процессов, АО «Ступинская металлургическая компания», Ступино, Россия. E-mail: Pchelnikov@smk.ru.

Казадаева Ольга Анатольевна – инженер-технолог отдела проектирования технологических процессов АО «Ступинская металлургическая компания», Ступино, Россия. E-mail: Kazadaeva_OA@smk.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

QFORM PROGRAMM APPLICATION FOR BILLET FORGING SIMULATION

Alexey V. Pchelnikov – Head of technology development department of “SMK”, Stupino, Russia. E-mail: Pchelnikov@smk.ru.

Olga A. Kazadaeva – Engineer of technology development department of “SMK”, Stupino, Russia. E-mail: Kazadaeva_OA@smk.ru.

***Abstracts.** The processes of forging of large-diameter billets on a hydraulic press are studied using simulation. This paper shows the results of process simulation of billets forging with the Qform program. There is values of the flow stress of Inconel 718 alloy used for forging simulation. The differences in the deformation of the billet during forging with different tools, with different feed and bites values are shown not only in terms of the accumulation of deformation, but also in terms of the probability of billet's defects. For prediction of the possible deformation defects appearance performed the calculation of damage accumulation during forging. The Cockroft-Latham formula is used in damage calculation.*

***Keywords:** forging, flow stress, Inconel 718, damage, Qform, Cockroft-Latham criterion.*

Ссылка на статью:

Пчельников А.В., Казадаева О.А. Применение программы Qform при моделировании процессовковки прутков // Теория и технология металлургического производства. 2020. №2(33). С. 29-33.

Pchelnikov A.V., Kazadaeva O.A. Qform programm application for billet forging simulation. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 33, no. 2, pp. 29-33.