

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В УДАРНЫХ ОБРАЗЦАХ ШАРПИ И ВЫЯВЛЕНИЕ ВАЖНЕЙШИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ДАННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ.

Иброхимов Б.Р.

*Докторант ТГТУ имени Ислама К.А. Узбекистан
ibrohimov.2017@list.ru*

Аннотация: В данном исследовании представлена стандартизированная схема испытания на удар по Шарпи и проведены эксперименты на образцах с различной шириной и боковыми канавками. Программа ABAQUS была использована для создания конечных элементов модели для анализа удара Шарпи. Полученные результаты свидетельствуют о том, что между шириной образца и ударной вязкостью существует положительная зависимость, в то время как наличие боковых канавок снижает её. Кроме того, исследование показало, что доля энергии вязкости составляет 67 % от энергии удара образца при минимальном влиянии геометрических характеристик.

Ключевые слова: Ударная вязкость, Шарпи, разрушение, энергия.

1. Введение

Ударное испытание по Шарпи - важнейший метод оценки ударной вязкости благодаря своей простоте и скорости. Он эффективен для выяснения механизма процесса ударного разрушения, а ударный стенд Шарпи помогает снять кривую нагрузка-перемещение во время этого процесса. При моделировании разрушения вязких металлов при высоких скоростях деформации модель Джонсона-Кука обладает значительной физической значимостью и относительно доступна, что делает её широко используемой моделью. Испытание на удар по Шарпи используется в различных областях. Испытательные машины часто оснащаются датчиками для измерения энергии, поглощенной при разрушении. Проводя испытания при различных температурах, можно построить кривые зависимости энергии удара от температуры. Для материалов с ОЦК решеткой, таких как сталь и чугун, эти кривые обычно имеют вытянутую форму «S», как показано на рисунке 1. Точка перегиба кривой или температура, при которой излом становится на 50 % хрупким, определяемая по поверхности излома, используются для определения температуры перехода от вязкости к хрупкости. Важно отметить, что эта температура перехода не является фундаментальным свойством материала и не должна использоваться для целей проектирования; вместо неё следует использовать такие свойства материала, как вязкость разрушения (K_{Ic}). Тем не менее, существуют ситуации, когда технические условия включают минимальное требование к энергии удара по Шарпи. Примерами

таких требований являются сосуды под давлением для ядерных реакторов и конструкции стальных мостов. Различные стандарты на ковкий чугун, включая ISO 1083:2004 (Чугуны с шаровидным графитом), DIN 15635 (Литейные формы - чугуны с шаровидным графитом), ASTM A5716 (Отливки из аустенитного ковкого чугуна для деталей, работающих под давлением, пригодных для эксплуатации при низких температурах) и ASTM A8977 (стандартная спецификация для отливок из аустемперированного ковкого чугуна) – все определяют минимальные значения по Шарпи. DIN 1563 устанавливает различные минимальные значения ударной вязкости в зависимости от размера сечения отливки; как правило, требования к ударной вязкости снижаются по мере увеличения размера сечения.

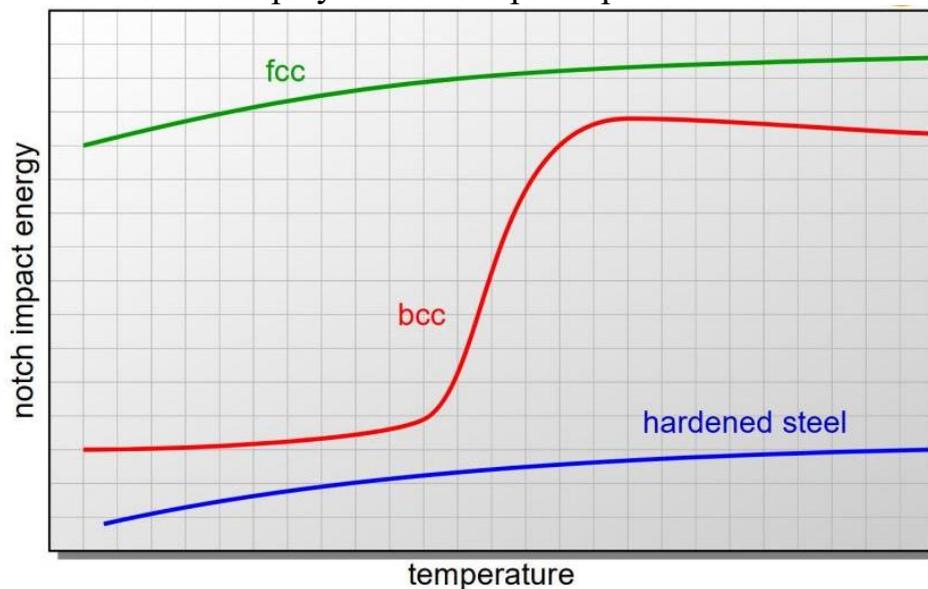


Рис.1. Кривая перехода от вязкого состояния к хрупкому

Было проведено множество экспериментов и конечно-элементного моделирования ударных испытаний по Шарпи. Тем не менее, существует недостаток исследований о том, как геометрические факторы, такие как боковые канавки, влияют на удар по Шарпи с использованием как экспериментальных, так и имитационных методов. В данном исследовании используется модель J-C для воспроизведения ударной реакции стали сосудов под давлением в ABAQUS, при этом изучается влияние различных важных геометрических факторов на характеристики материала. Результаты этого исследования могут оказать надёжную помощь в инженерной практике.

2. Экспериментальная и теоретическая часть

Испытание на удар по Шарпи проводится в соответствии с ГОСТом 9454-78. В испытании используются стандартные образцы с V-образным надрезом по типу 11, имеющие одинаковые размеры профиля. Образец для

испытания изображен на рисунке 2(а), а геометрические размеры показаны на рисунке 2(б). Длина образца составляет 55 мм, а ширина и высота - по 10 мм. На рисунке 2 показан прибор для испытания на удар по Шарпи и вид образца. Образец с выемкой помещается между двумя опорными блоками испытательной машины. Для измерения поглощенной энергии образец подвергается удару маятника. Во время удара датчик силы, расположенный в маятнике, регистрирует кривую «нагрузка-перемещение».

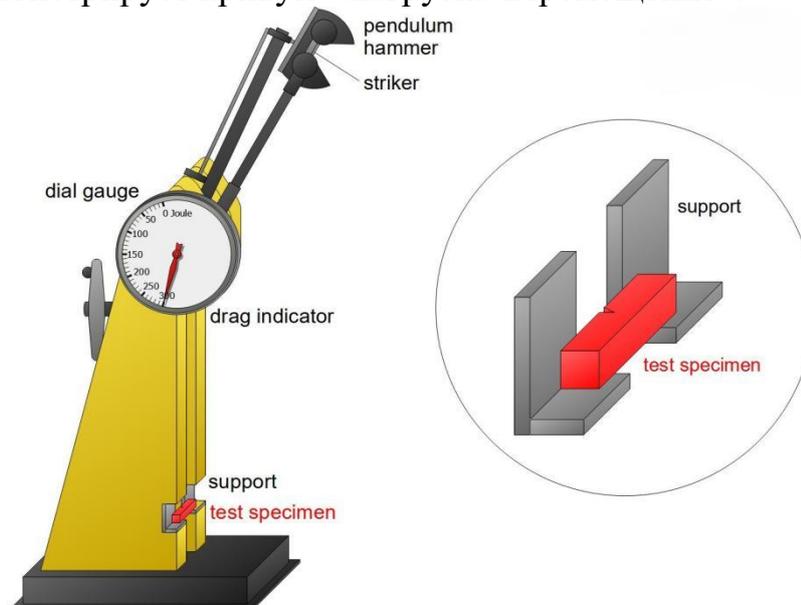


Рис.2. Маятниковый копер

2.2 Теоретическая модель

Модель Джонсона-Кука зависит от напряжения при растяжении, учитывает деформационное упрочнение, скоростное упрочнение и термическое смягчение. Уравнение (1) символизирует модель Джонсона-Кука.

$$\sigma_{eq} = A + B \varepsilon_{eq}^{pl n} + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \left(1 - \frac{T - T_o}{T_{melt} - T_o} \right)^m \quad (1)$$

Модель Джонсона-Кука представляет собой пластичную модель и модель разрушения, применяемую к металлическим конструкциям, которая широко используется в инженерии из-за простого описания формы и небольшого количества параметров, которые можно найти.

2.3. Испытание на программе ABAQUS

Численное моделирование удара Шарпи проводилось с помощью программы ABAQUS, в которой был создан трехмерный образец деформируемого тела. Модель метода конечных элементов (МКЭ) состоит из ударного маятника и опоры образца. Разрушение образца происходит в результате столкновения маятника с образцом. Для упрощения процесса расчета маятник рассматривается как жесткое тело, как показано на рис. 3.

Свойства материала пуансона и опоры определяются как аналитические твердые тела с плотностью железа $7,8 \times 10^3$ кг/м³, модулем упругости 120 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,25. Начальная скорость пуансона задана как 5,23 м/с вдоль оси *y*, а на движение в других направлениях наложены ограничения. Опора образца полностью ограничена во всех направлениях, в то время как сам образец остаётся неограниченным. Между образцом и опорой устанавливается контакт движения, при этом коэффициент трения для взаимодействия Пуансона и образца составляет 0,2.

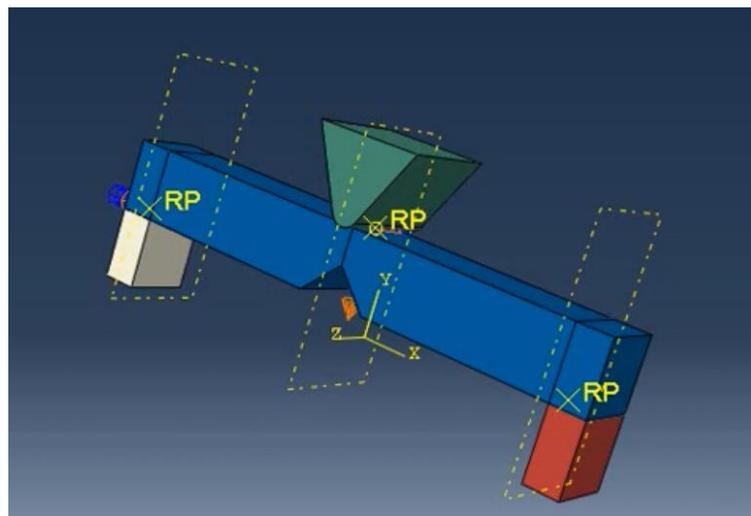


Рис.3. Вид образца на программе АВАQUS

Таблица-1. Параметры конструкционной модели J-C СЧ 25

Материал	ρ (кг·м ⁻³)	E (ГПа)	ν	σ_T (МПа)	σ_B (МПа)
СЧ 25	7800	120	0.25	180	240
n	c	m	D₁	D₂	D₃
0,49	0,037	0,135	0,18	0,546	1,467
D₄	D₅				
0,003	-0,831				

3. Результаты

Максимальная глубина боковых канавок для образцов определяется стандартом ASTM E23-2018, который устанавливает ограничение в 0,25 от толщины. В данном случае для образцов шириной 10 мм установлена максимальная глубина 2,5 мм. Для исследования ударных характеристик образцов с боковыми канавками были обработаны две боковые канавки с обеих сторон надреза. Для анализа поведения при ударе было проведено моделирование образцов с глубиной боковых канавок 1 мм, 1,5 мм, 2 мм и 2,5 мм. Результаты моделирования представлены на рисунках 4 и 5. На рис. 4 показаны результаты моделирования удара образца с боковыми канавками. На рисунке 5 приведено сравнение кривых зависимости нагрузки от перемещения при испытании и моделировании для образца с боковой

канавкой диаметром 2 мм. Кривые близко совпадают, максимальная разница в нагрузке составляет менее 2 кН, а разница в энергии удара - 6 Дж, что дает погрешность около 7,9 %.

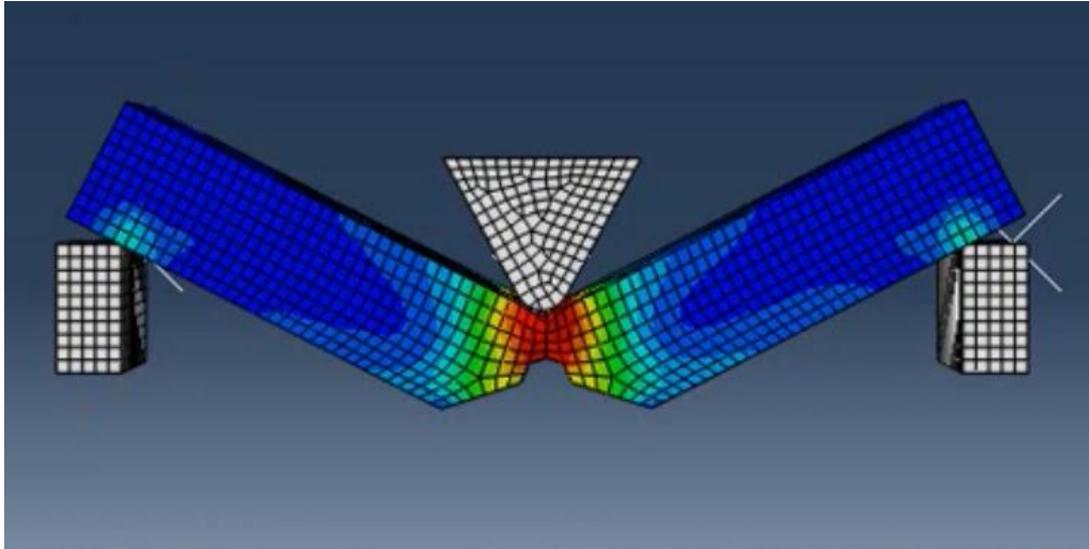


Рис.4. Результаты симуляции при разрушение

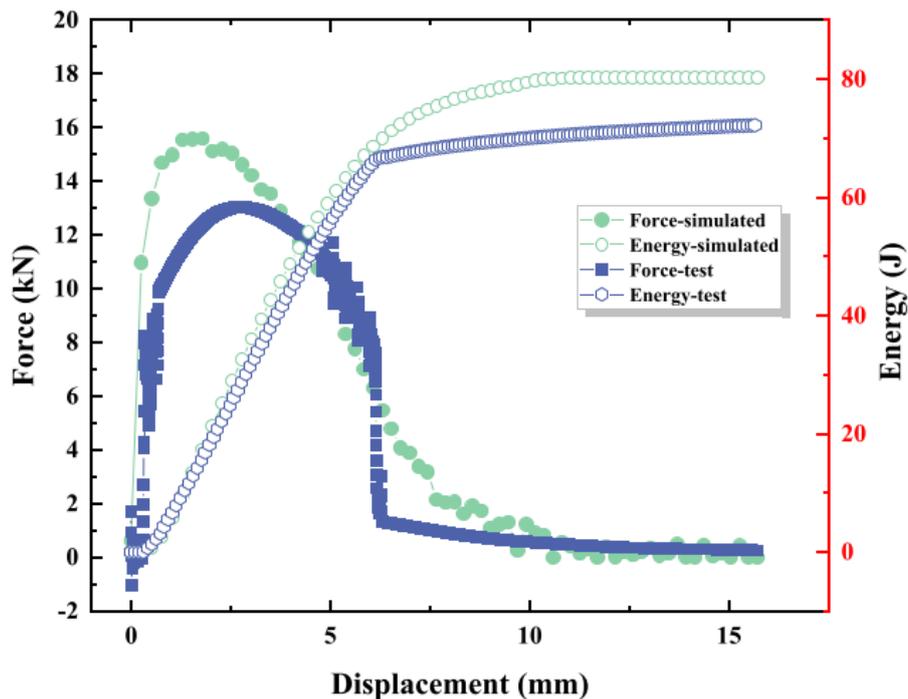


Рис.5. Кривые зависимости энергии и силы удара от перемещения для образца с боковой канавкой.

4. Заключение

В исследовании изучалось, как поведение боковых канавок и ширина образцов влияют на поведение при ударе по Шарпи. Результаты показывают, что канавки снижают силу и энергию, ускоряют распространение трещины и приводят к образованию линейной поверхности разрушения. Глубокие



канавки оказывают заметное влияние, в то время как угол и ширина канавки имеют минимальное влияние.

Использованная литература

1. A. Bedolla-Jacuinde, M.W. Rainforth, and A. Meji'a. The Role of Silicon in the Solidification of High-Cr Cast Irons. *Metallurgical and materials transactions A* 856—Volume 44a, February 2013. DOI: 10.1007/s11661-012-1434-8
2. D. M. Norris, Jr. Computer simulation of the Charpy V-notch toughness test. *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 11, pp. 261-274, 1979
3. Wenquan Cao, Mingda Zhang, Chongxiang Huang, Shuyang Xiao, Han Dong & Yuqing Weng. Ultrahigh Charpy impact toughness (~450J) achieved in high strength ferrite/martensite laminated steels. *Scientific Reports* | 7:41459 | DOI: 10.1038/srep41459
4. Sukru Ergin Kisakurek and Ahmet Ozel. Unnotched Charpy Impact Energy Transition Behavior of Austempered Engineering Grade Ductile Iron Castings. DOI: 10.1007/s11663-013-9976-8
5. Zhi-gang Tao, Ke Qin, Shu-lin Ren, Hao-tian Xu, Man-chao He. Influence of notch volume on mechanical properties of a novel high-strength and high-toughness steel. <https://doi.org/10.1007/s42243-023-00953-1>
6. Tomohiro Ikeda, Takuo Umetani, Nobuhiro Kai, Nao-Aki Noda and Yoshikazu Sano. Strain Rate and Temperature Insensitiveness of Notch-bend Strength for High Si Ductile Cast Iron. *ISIJ International*, Vol. 56 (2016), No. 5, pp. 868–874 DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-516>
7. Tomohiro Ikeda, Nao-Aki Noda, Yoshikazu Sano. Conditions for notch strength to be higher than static tensile strength in high-strength ductile cast iron. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.11.034>
8. Xin-ning Zhang, Ying-dong Qu, Rong-de Li. Low Temperature Impact Toughness and Fracture Analysis of EN-GJS-400-18-LT Ductile Iron under Instrumented Impact Load. *Journal of iron and steel research, International*. 2015, 22(9): 864-869