

**УПРОЧНЕНИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ
В ПРОЦЕССЕ СОУДАРЕНИЯ ПЛАСТИН
ПРИ ПЕРЕМЕННОМ УГЛЕ ВСТРЕЧИ**

А. А. Дерибас, В. М. Кудинов, Т. М. Соболенко

(Новосибирск)

В настоящее время известен ряд способов упрочнения металлов при использовании импульсивных нагрузок. Среди них значительное место занимает упрочнение ударными волнами.

В настоящих опытах использовалась схема соударения, показанная на рис. 1. Обычно неподвижная пластина 3 устанавливалась на массивное основание 4, на расстоянии h_0 от ее поверхности располагалась

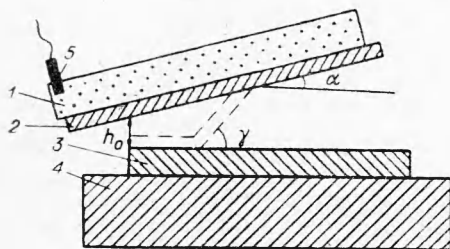


Рис. 1. Схема соударения пластин.

метаемая пластина 2 под некоторым начальным углом α . Сверху метаемой пластины помещался плоский заряд ВВ 1, после инициирования которого капсюлем-детонатором 5 пластина 2 приобретала скорость v_0 , направленную к пластине 3. Так как скорость распространения детонации (D) конечна, угол соударения пластин γ больше начального угла α , и область соударения передвигается

вдоль поверхности неподвижной пластины с конечной скоростью v_k . При изменении начального угла α , высоты заряда ВВ, скорости его детонации и размеров пластины, мы исследовали соударения пластин в большом диапазоне углов встречи ($0 < \gamma \leq 30^\circ$), скоростей метаемой пластины ($300 \text{ м/сек} < v_0 < 1500 \text{ м/сек}$) и перемещения точки контакта ($1 \text{ км/сек} \leq v_k \leq \infty$).

Для расчета скоростей метаемой пластины, скорости точки контакта и угла соударения использовались формулы, приведенные в работе [1]:

$$\gamma = \alpha + 2 \arcsin \frac{v_0}{2D}, \quad (1)$$

где D — скорость детонации ВВ;

$$v_0 = 1,2 D \frac{\sqrt{1 + \frac{32}{27}r - 1}}{\sqrt{1 + \frac{32}{27}r + 1}}. \quad (2)$$

Здесь r — безразмерный параметр, равный отношению массы ВВ к массе метаемой пластины одинаковой с зарядом площади,

$$v_k = D \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin \gamma}. \quad (3)$$

В частном случае, когда $\gamma = 0$ и скорость точки контакта бесконечна, соударение является плоским. При этом возникают плоские ударные волны, параметры которых могут быть легко определены, если известны ударные адиабаты металлов и скорость v_0 [2]. Исследованию упрочнения металлов плоскими ударными волнами посвящено большое число работ [3—5], в которых установлено, что величина упрочнения обычно пропорциональна давлению во фронте ударной волны.

При малых углах соударения и сверхзвуковых скоростях точки контакта в области соударения возникают ударные волны, связанные с точкой контакта. Для расчета давлений и других параметров таких ударных волн могут быть использованы формулы, выведенные в работе [6].

При увеличении угла соударения скорость точки контакта становится меньше скорости звука в металлах. Обычно в этом случае соударение пластин сопровождается их прочным соединением, а вблизи контактных поверхностей наблюдаются интенсивные остаточные пластические деформации металлов, которые имеют специфическую волнообразную форму.

Обработка опытного материала велась следующим образом: после соударения из середины пластин вырезался образец 30×25 мм, так чтобы разрез проходил возможно более точно по центральной осевой линии пластины. На поверхности образца, соответствующей поперечному сечению соударенных пластин, обычным методом изготавливался шлиф, на котором изучалась структура и замерялась микротвердость.

Наиболее подробно исследовались малоуглеродистые стали, так как для них специфическое упрочнение, резко отделяющее область существования давлений выше 130 кбар (давление фазового перехода) от области, куда оно не распространялось, весьма просто определяется металлографически на шлифе и хорошо согласуется с микротвердостью.

На рис. 2 приведена типичная картина образца, состоящего из пластин стали 08КП и Ст. 3, имеющего упрочнение на некоторую глубину в обе стороны от зоны соударения, определенное по изменению размеров отпечатков микротвердости и характерному «множественному искажению» внутренней структуры зерен. Подобная структура зерен феррита получена при действии ударных давлений, генерированных с помощью ВВ [7, 8]. После замера микротвердости по сечению образца строился график, на котором на отрицательную часть оси абсцисс наносили результаты замеров, проведенных на метаемой пластине, на положительную — на неподвижной пластине (см. рис. 2).

Как можно заметить, исходная твердость метаемой и неподвижной пластин оказалась существенно различной. Численные значения упрочнения, полученного в результате соударения, также не одинаковы. Если взять эти величины в отношении их с исходными, то полученная безразмерная характеристика твердости обеих пластин окажется почти одинаковой, поэтому именно ее решено было взять за изучаемую величину упрочнения. В [9] указывается, что с увеличением содержания углерода (увеличение количества перлита в структуре стали) рассеяние энергии ударной волны происходит более интенсивно, а упрочнение феррита стали затруднено. Однако, поскольку в настоящих опытах стали с большим количеством углерода, чем в Ст. 3, не исследовались, а сталь

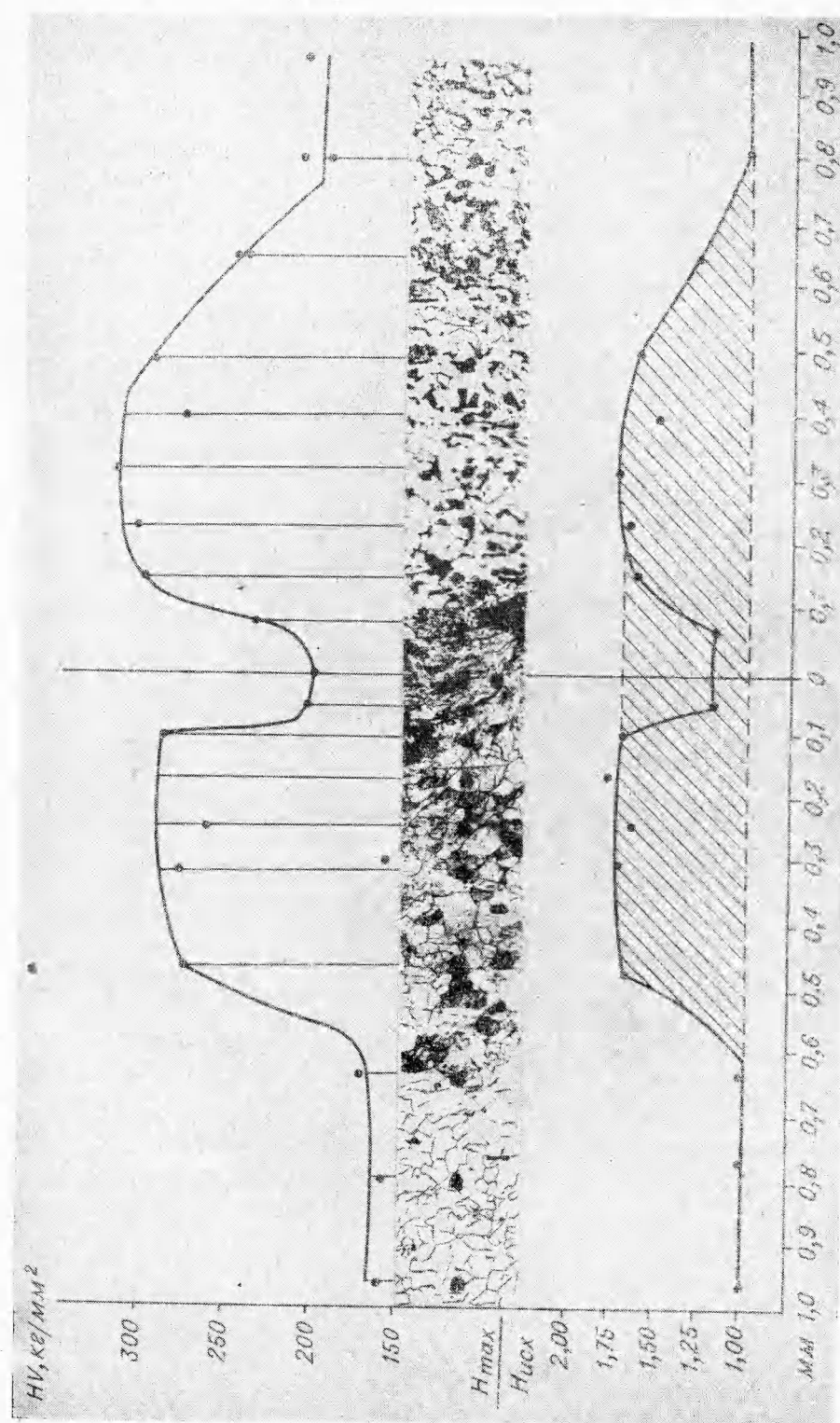


Рис. 2. Типичное распределение упрочнения по сечению после соударения пластины малоуглеродистой стали.

Ст. 3 имеет практически одинаковую тенденцию к ударному упрочнению со сталью 08КП и Ст. 10, то их совместное исследование допустимо.

Рассматривая графики твердости вместе со структурой, приведенные на рис. 2, можно заметить, что в зернах, где отсутствует «множественное искажение» структуры феррита, соответствующее давлению выше 130 кбар, почти нет увеличения твердости.

В данном примере твердость от упрочненной области к неупрочненной падает довольно резко. Однако наблюдались и другие случаи, когда упрочнение не сосредоточено четко в области, прилежащей к поверхности соударения, а более или менее равномерно распределено по всему сечению образца. Для того чтобы учесть эту особенность упрочнения в сечении пластин и для более подробного рассмотрения обнаруженной зависимости упрочнения переменных параметров, из графиков твердости бралась для анализа некоторая площадь между кривой упрочнения и осью абсцисс, характеризующая распространение безразмерного упрочнения по сечению образца.

Было обработано 70 пар соударенных при различных начальных параметрах пластин из малоуглеродистой стали.

Отличие прежних постановок опытов по изучению упрочнения по схеме ударного нагружения при соударении пластин [3—5] от описываемых состоит в том, что существенную роль в последних играет угол встречи соударяющихся пластин и процесс уже не является одномерным. В настоящей работе поэтому исследовалось упрочнение не только в зависимости от скорости метаемой пластины v_0 , но и от угла соударения γ .

Рассмотрим серию опытов, в которых были сохранены постоянными следующие параметры: вид и количество ВВ, толщина метаемой пластины, высота начальной установки (h_0). Эти параметры выбирались так, что при плоском одномерном соударении возникало давление в 155 кбар, несколько превышающее давление фазового перехода железа. В опытах варьировался угол встречи пластин γ от 0° (плоское соударение) до 25° , что достигалось различной установкой начального угла α (рис. 3).

Было обнаружено, что соударение пластин в плоскопараллельном варианте ($\gamma=0$) дает упрочнение в 1,2 раза, почти на 1 мм в глубину. Изменения микроструктуры не наблюдалось. Увеличение угла встречи γ приводит к постепенному увеличению упрочнения и небольшому увеличению глубины его распространения. При критическом угле соударения, когда скорость точки контакта становится равной скорости звука в металле, появляется большое упрочнение, достигающее 1,8 от исходной твердости.

При рассмотрении в металлографический микроскоп зоны упрочнения обнаруживается «множественное искажение» структуры феррита в стали, характерное для случая, когда в металле при прохождении удар-

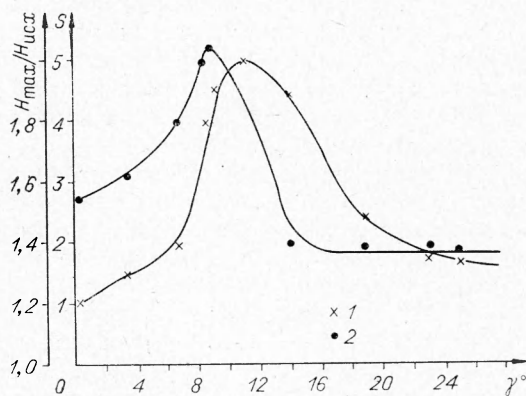


Рис. 3. График упрочнения пластин малоуглеродистой стали при соударении их под различными углами.

1 — безразмерное упрочнение ($H_{\max}/H_{\text{исх}}$);
2 — интегральная площадь упрочнения.

ной волны существуют давления много выше фазового перехода. Глубина распространения упрочнения в этом режиме значительна, но не максимальна. Увеличение глубины распространения и небольшое его численное возрастание по величине происходит еще до некоторого угла (в данном случае до угла $\gamma = 11^\circ$), а затем падает (в нашем случае при $\gamma = 14^\circ$) по величине и глубине распространения. При угле $\gamma = 14^\circ$ и более заметно начинает сказываться течение металла в процессе волнообразования, так что зона, захваченная волнообразованием, оказывается сравнимой с зоной упрочнения. В дальнейшем исчезает «множественное искажение» структуры в зоне соударения пластин, а наблюдаемое по изменению формы, размеров и направлению вытянутости зерен течение металла в зоне волнообразования соответствует увеличению твердости материала.

Можно сделать вывод, что решающую роль в изменении характера упрочнения играют углы, под которыми происходят соударения пластин. Однако попытка свести зависимость упрочнения только к углам соударения показала недостаточность этого предположения, как и при выводе зависимости упрочнения только от скорости метаемой пластины v_0 , которая однозначно определяет давление соударения при одномерной схеме. При одних и тех же углах соударения для разных скоростей метания можно было наблюдать и упрочнение, и его полное отсутствие. Одновременное рассмотрение зависимости упрочнения от углов соударения и скоростей метаемой пластины v_0 показало, что такая связь может быть намечена; однако довольно часто встречаются резкие отклонения, которые нельзя объяснить ошибкой опыта.

Рассмотрим формулу (2) для определения максимальной скорости пластины, где v_0 зависит от безразмерного параметра r . Из этой формулы следует, что можно подбором высоты заряда ВВ получить одинаковые скорости пластин, имеющих различную толщину. Но от толщины пластин должно зависеть время действия давления и абсолютные размеры зоны упрочнения, поэтому вместо скоростей метаемой пластины для всех опытов была сосчитана кинетическая энергия единицы площади метаемой пластины.

Нанесение на один график (рис. 4) значений максимального упрочнения в зависимости от энергии метаемой пластины и углов соударения показало, что существуют целые области режимов, в которых при соударении осуществляется специфическое упрочнение, а стало быть, существуют на определенных расстояниях давления выше фазового перехода (130 кбар). Можно видеть, что при малых энергиях существует весьма малый диапазон углов ($5-7^\circ$) соударений, когда реализуется описанное выше специфическое упрочнение. Глубина распространения этого упрочнения также мала. Вне этого диапазона изменения углов соударения для малых энергий специфического упрочнения не наблюдается. Увеличение энергии ведет к увеличению углов и расширению диапазона их изменения, когда реализуется специфическое упрочнение.

Отметим, что при соударении с другими металлами, а именно с медной пластиной, наблюдаемое в стали специфическое упрочнение занимает ту же площадь и возникает при таких же соответствующих величинах энергий и углов (см. рис. 4, 5).

Для того чтобы объяснить причину возникновения обнаруженного при соударении малоуглеродистых пластин специфического упрочнения и понять закономерность его изменения, рассмотрим упрощенно картину соударения пластин.

Если соударение пластин является достаточно сильным, то можно пренебречь прочностными силами по сравнению с инерционными и

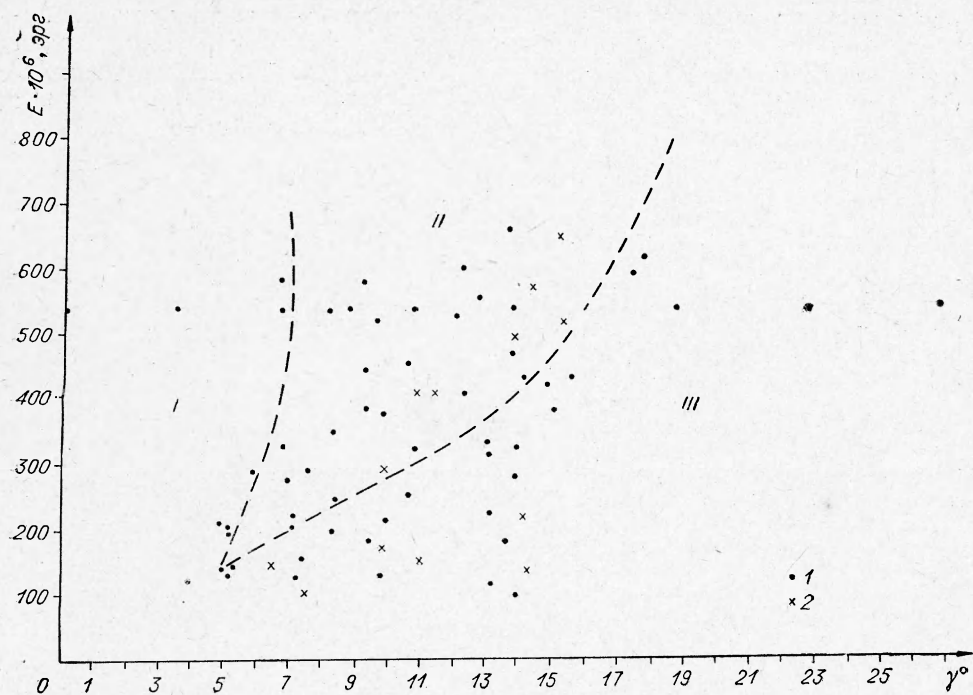


Рис. 4. Максимальное упрочнение малоуглеродистых пластин при соударении стали со сталью (1) и меди со сталью (2).

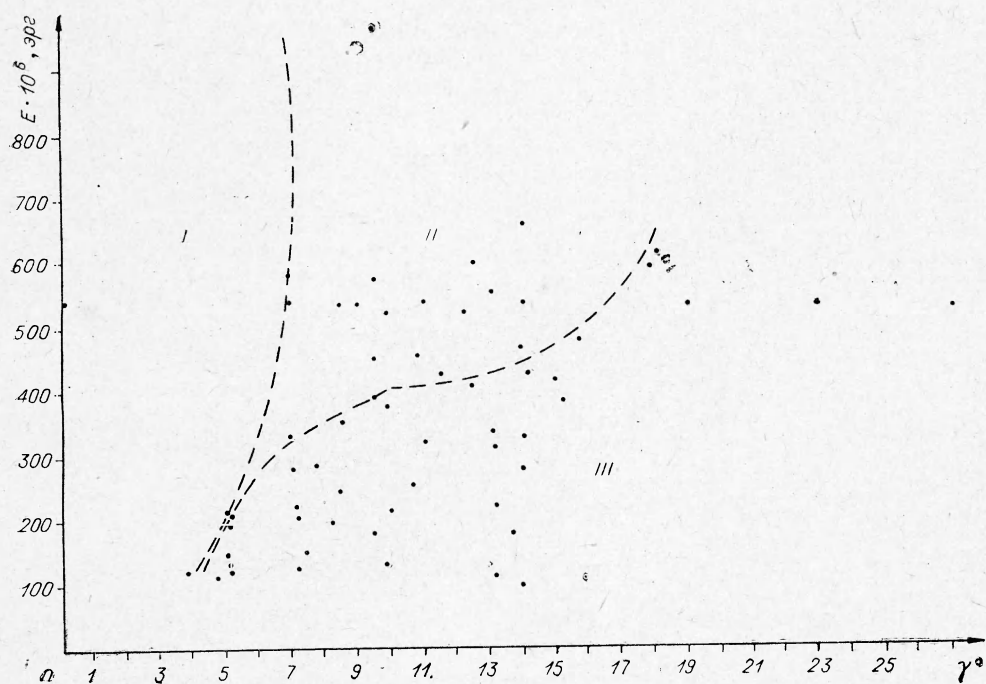


Рис. 5. Общая диаграмма упрочнения малоуглеродистых пластин при различных условиях соударения.

рассматривать движение в области соударения как задачу гидродинамики [10]. В системе координат, связанной с точкой контакта, задача сводится к задаче о слиянии двух плоских струй жидкости под углом γ . Скорость струй в этой системе координат определяется формулами [1]:

$$v_1 = v_k \frac{\cos\left(\frac{\gamma + \alpha}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\gamma - \alpha}{2}\right)}. \quad (4)$$

Если скорость струй v_1 меньше скорости звука ($v_k < c_0$), ударными волнами в гидродинамической теории кумуляции обычно пренебрегают и рассматривают задачу в рамках идеальной несжимаемой жидкости [10]. В случае симметричного соударения пластин обычно происходит образование кумулятивной струи, а параметры течения поддаются расчету [11]. Максимальные давления имеют место в точке торможения и легко определяются из уравнения Бернулли:

$$p_0 = \frac{\rho_1 v_1^2}{2},$$

где ρ_1 — плотность пластины; v_1 — скорость струй в подвижной системе координат.

Легко видеть, что при $v_1 \approx c_0$ максимальные давления могут достигать значений порядка нескольких мегабар. Однако возникающие давления существуют очень короткое время и при удалении от точки соударения падают весьма резко. Существующие методы оценки давлений на некотором расстоянии от точки торможения показывают, что глубина распространения давления растет с увеличением угла γ при $v_1 = \text{const}$ и с увеличением v_1 при $\gamma = \text{const}$. Следует иметь в виду, что в случае, когда v_0 постоянна и изменяется только начальный угол, эти процессы становятся конкурирующими: при увеличении α угол γ увеличивается, а v_1 уменьшается.

В наших опытах использовались несимметричные соударения, когда вместо кумулятивной струи в области соударения происходило образование волн. Допустим в первом приближении, что в этом (несимметричном) случае характер распределения давления по сечению пластин вне зоны волнообразования подобен кумулятивному режиму соударения и величина упрочнения пропорциональна давлению. При сделанных допущениях возможно предполагать следующее качественное объяснение наблюдаемых явлений.

Последим, как должен влиять на упрочнение угол соударения при $v_0 = \text{const}$. При $\gamma = 0$ соударение является плоским. Наблюдаемое упрочнение пластин соответствует давлениям на фронте плоских ударных волн. При увеличении угла упрочнение несколько увеличивается в связи с ростом давления на фронте косых ударных волн. Согласно работе [6], при достижении определенного критического угла γ давление за фронтом косой ударной волны примерно вдвое больше давления при плоском ударе ($\gamma = 0$). Когда угол соударения становится больше критического, резко изменяется вся конфигурация течения и образуются волны или кумулятивная струя, так как ударные волны, появившиеся в первый момент соударения, уходят вперед от точки контакта и течение в области соударения становится дозвуковым. Давление в области соударения при

этом резко возрастает из-за торможения потока. Упрочнение металла в области соударения также резко возрастает (см. рис. 3).

При дальнейшем увеличении угла соударения область повышенного давления расширяется, хотя абсолютная величина максимального давления уменьшается из-за уменьшения скорости течения, что видно из формул (3), (4). Подобные изменения происходят и с распределением упрочнения по сечению пластин. Наконец, при больших углах соударения специфическое упрочнение исчезает, так как абсолютная величина давлений становится меньше давлений в 130 кбар, необходимых для фазового перехода в железе.

Подобным образом можно объяснить и более общую диаграмму упрочнения, представленную на рис. 4 и 5. Здесь упрочнение в левой части диаграммы (I), по-видимому, соответствует области существования ударных волн, связанных с точкой контакта. Область повышенного упрочнения (II) соответствует соударениям с дозвуковой скоростью точки контакта. В области (III), соответствующей большим углам соударения и малым скоростям метаемой пластины, малоуглеродистая сталь вообще не имеет специфического упрочнения, что можно объяснить уменьшением давления вне зоны волнообразования ниже давления фазового перехода, равного 130 кбар.

Таким образом, полученные экспериментальные данные подтверждают предположение о том, что в случае соударения пластин с дозвуковой скоростью точки контакта можно пренебрегать ударными волнами и производить оценку давления вне зоны волнообразования по гидродинамической схеме расчета.

В заключение отметим, что высказанное предположение более точно может быть проверено путем количественного сопоставления величины давления по поперечному сечению образцов с величиной упрочнения.

Поступила в редакцию
16/VI 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас, В. М. Кудинов и др. ФГВ, 1967, 2.
2. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
3. C. S. Smith. Trans. Metallurg. Soc. AIME, 1958, 212, 574.
4. G. E. Dieter. Hardening effect produced with shock waves. Strengthening Mechanics in Solids, 1960.
5. Э. С. Атрошенко, П. О. Пашков, И. М. Рядинская. Физика металлов и металловедение, 1965, 19, 4, 619.
6. M. Walsh, R. Shreffer, F. I. Willing. J. Appl. Phys., 1953, 24, 349.
7. Дж. Пирсон, Дж. С. Райнхарт. Поведение металлов при импульсивных нагрузениях. ИЛ, 1958.
8. Т. М. Соболенко. ФГВ, 1966, 4.
9. S. Sing, & Soundrarey. J. Appl. Phys., 1958, 29, 111.
10. М. А. Лаврентьев. Усп. матем. наук, 1957, 12, 4.
11. М. И. Гуревич. Теория струй идеальной жидкости. М., Физматгиз, 1961.