

# КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИЗГИБЕ ПРИКРОМОЧНЫХ УЧАСТКОВ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ DEFORM 2D-3D

С.В. Самусев<sup>1</sup>, Г.П. Жигулев<sup>1</sup>, А.И. Романцов<sup>2</sup>, К.Л. Жигунов<sup>2</sup>,  
М.С. Сигида<sup>2</sup>, Д.А. Муртазина<sup>1</sup>, П.А. Панкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИТУ «МИСиС» г. Москва, Россия,

<sup>2</sup>ОАО «Челябинский трубопрокатный завод», г. Челябинск, Россия

В результате воздействия на заготовку деформирующего инструмента в заготовке происходят перемещения частиц относительно друг друга. Поля перемещений частиц, скорости их перемещений, скорости деформаций и деформации в дальнейшем являются основой для расчёта полей напряжений, а также инвариантных характеристик, определяющих энергию формоизменения и другие силовые характеристики процесса деформации.

Кинематический анализ процесса деформации позволяет показать логичность всех последующих решений. На примере подгибки прикромочного участка листовой заготовки в работе на основе моделирования в среде [DEFORM](#) представлены траектории частиц, поля скоростей перемещений и скоростей деформаций для упругопластической среды, распределение компонент деформаций и интенсивности деформаций в сечениях заготовки. Применение методики построения графиков в лагранжевых координатах позволяет учесть историю нагружения материальных частиц и неравномерность деформации, связанную с режимами формоизменения и конструкцией деформирующего инструмента.

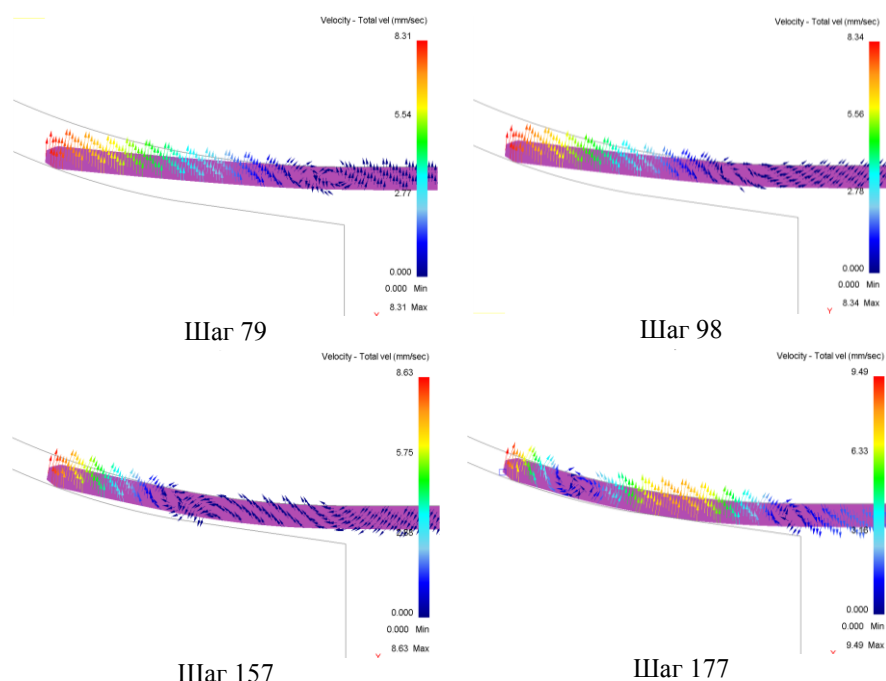


Рис. 1 – Цветовые диаграммы распределения абсолютной скорости  $V_t$  перемещения частиц заготовки при подгибке кромки по шагам: 79-98-157-177

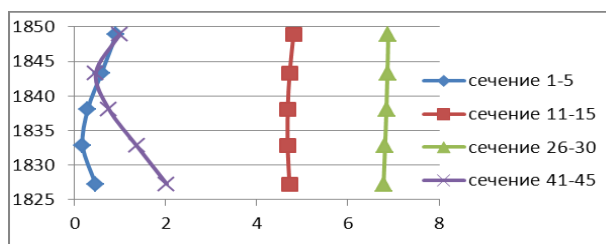


Рис. 2 – Эпюра распределения абсолютной скорости  $V_t$  перемещения частиц заготовки при подгибке кромки на шаге 177 (конечная стадия нагружения)

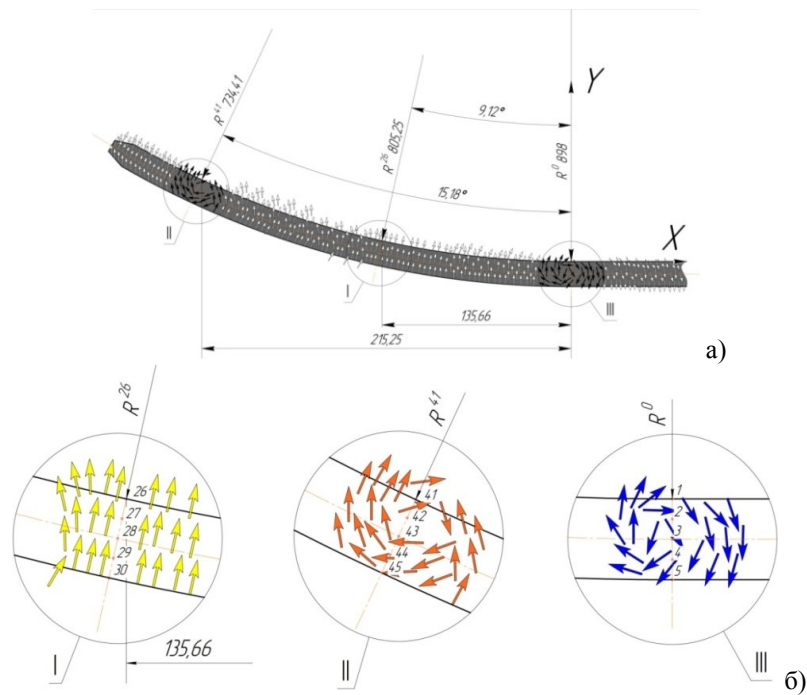


Рис. 3 – Векторы  $V_i$  перемещения частиц заготовки при нагружении кромки на КГП: а – на шаге 177; б – в сечениях 1-5, 26-30, 41-46

На графиках компоненты скорости перемещения частиц в очаге деформации обозначены  $V_x$  и  $V_y$  в направлении осей координат  $X$  и  $Y$  соответственно. Полученные результаты расчёта соответствуют плоскодеформированному состоянию при нагружении несжимаемого изотропного материала. Отметим, что в методике обработки цифровой информации использованы как начальные (лагранжевы) координаты для учёта истории нагружения, так и текущие (эйлеровы) координаты в случае исследования мгновенных состояний деформируемой среды.

Компоненты скорости перемещения частиц  $V_x$  и  $V_y$  при подгибке кромки могут служить оценкой логичности получаемых в дальнейшем характеристик НДС. Распределение компонент и модуля полной скорости перемещений частиц в поперечных сечениях показано на рис. 1-3. Ход кривых для сечений показывает, что минимальные значения  $V_y$  принадлежат частицам, вступающим в контакт с неподвижным инструментом. Частицы, которые контактируют с подвижным нижним инструментом, имеют скорость  $V_y$ , равную скорости перемещения деформирующего нижнего инструмента с небольшими отклонениями за счёт вышеуказанных погрешностей счёта в среде DEFORM.

#### Анализ картин распределения вектора скорости перемещения частиц

Особенностью течения металла при подгибке кромки, как видно из диаграмм, представленных на рис. 1, 2 является резкая неоднородность распределения полных скоростей перемещения материальных частиц, как по модулю, так и по направлению. Причиной этого является изменяющийся во времени контакт верхнего и нижнего инструментов с заготовкой. Протяжённость контактных зон и позиционирование их относительно оси симметрии заготовки пояснены в тексте и представлены на рисунках.

Согласно транспортированной в DEFORM модели сборки схемы настройки по мере движения нижнего инструмента вверх, как показали расчёты, внешняя кромка длительное время находится в точечном контакте с инструментом, тогда как длина контактной поверхности внутренней поверхности кромки с эвольвентой верхнего инструмента постоянно изменяется по протяжённости и перемещается в процессе подгибки.

В результате неравномерного контактного взаимодействия заготовки и инструмента в заготовке возникли три характерные зоны (рис. 3). Зоны 2 и 3 характеризуются локальными концентрациями вихревых движений частиц с одинаковыми направлениями поворотов векторов скорости перемещения частиц. Тогда как в сечении 1 и в других промежуточных зонах скорости частиц направлены в одну сторону в зависимости от положения рассматриваемых зон. Зоны 2 и 3 можно считать областями раздела между однонаправленными потоками частиц соседних участков заготовки. Отметим также, что сечения, перпендикулярные в исходном положении, поворачиваются при подгибке вокруг точек контакта с инструментом на угол равный локальному значению угла эвольвенты верхнего инструмента.

Участки между зонами 1, 2, 3, характеризуются более равномерным течением металла заготовки, хотя и изменяющимся по направлению во времени нагружения. Так, начиная со 138 шага направление течения частиц резко изменяется на противоположное. Частицы начинают перемещаться в сторону контактной поверхности верхнего инструмента на участках между 1-2 и 2-3 зон, хотя и под разным углом по отношению к ней. До 138 шага по времени за счёт воздействия нижнего инструмента на концевой участок заготовки частицы перемещались на вышеуказанных участках в направлении от контактной поверхности верхнего инструмента с образованием незначительного зазора размером 0,5-0,8 мм. Как показали расчёты, только в промежутке по времени от 138 шага и до 177 шага в конце нагружения кромка начинает прижиматься нижним инструментом к поверхности эвольвенты верхнего инструмента, что и показывают значения по модулю и направлению векторы перемещения частиц (рис. 1, 2).

Анализ расчётных значений параметров кинематики частиц ТЗ при подгибке кромки показал следующее. При нагружении в кромке заготовки формируются в соответствии со схемой настройки 7 участков с различными параметрами кинематики частиц (рис. 1, 2, 3). Участки в сечениях 1, 2 и 3, где стыкуются зоны с равнонаправленными

перемещениями, но с разными по направлениям векторами скоростей частиц характеризуются самой высокой неоднородностью распределения скоростей перемещения. Участки, располагающиеся между сечениями 1, 2, 3, характеризуются более равномерным характером течения, но с изменениями в направлении течения частиц в зависимости от перемещения нижнего инструмента. Примерно в интервале 0,6-0,7 величины хода нижнего инструмента по данной схеме настройки начинается охват заготовкой поверхности эвольвенты верхнего инструмента.

#### Особенности Кинематика частиц при разгрузке кромки

При разгрузке кромки расчёты скоростей показали следующее. Как видно из цветовых диаграмм, разгрузка начинается более интенсивно на участке торца кромки и замедляется при движении по направлению к прижиму. В области прижима наблюдается резкая локализация параметров скорости частиц, связанная с уменьшением величины модуля скорости и его направлением. Причём скорость перемещения торцевого участка кромки более резко уменьшается до 240-го шага разгрузки и по времени почти не изменяется в интервале 245-275 шагов разгрузки.

При разгрузке не наблюдается зон с резкой локализацией скорости в сечениях 2 и 1 в отличие от процесса нагружения, за исключением сечения, контактирующего с прижимом. Примерно половина кромки по длине, считая от торца, разгружается с большей (примерно в 1,5-1,6 раза) скоростью по сравнению с оставшейся частью зажатой прижимом. Причём направление векторов скоростей при разгрузке почти не изменяется и можно считать примерно совпадающим с направлением движения нижнего инструмента.

Таким образом, при разгрузке кромки по характеру распределения направлений скоростей перемещения вся длина может быть разделена на два участка примерно одинаковой длины: приторцевой участок, скорость которого в среднем в полтора раза выше средней скорости второго участка, примыкающего к прижиму. Всё выше сказанное относительно неравномерности полей скоростей частиц при подгибке отразится и на характере распределения деформаций и напряжений в кромке как при нагрузке, так и при разгрузке.

Результаты расчетов, полученные в среде DEFORM, использованы для построения напряжений и деформаций для любых фиксированных сечений листовой заготовки. Неравномерность полей напряжений и деформаций, полученных на основе учебной версии DEFORM с учётом экспериментальных данных ОАО «ЧТПЗ», позволяет учесть локальные эффекты упругопластической деформации и при необходимости корректировать первоначальную настройку инструмента и режимы деформирования с целью получения качественной заготовки.

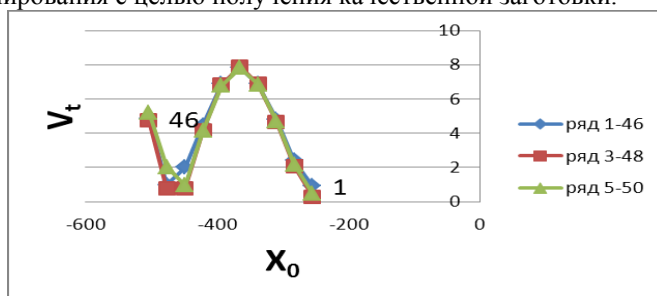


Рис. 4 – Эпюры модуля полной скорости частиц кромок  $V_t$